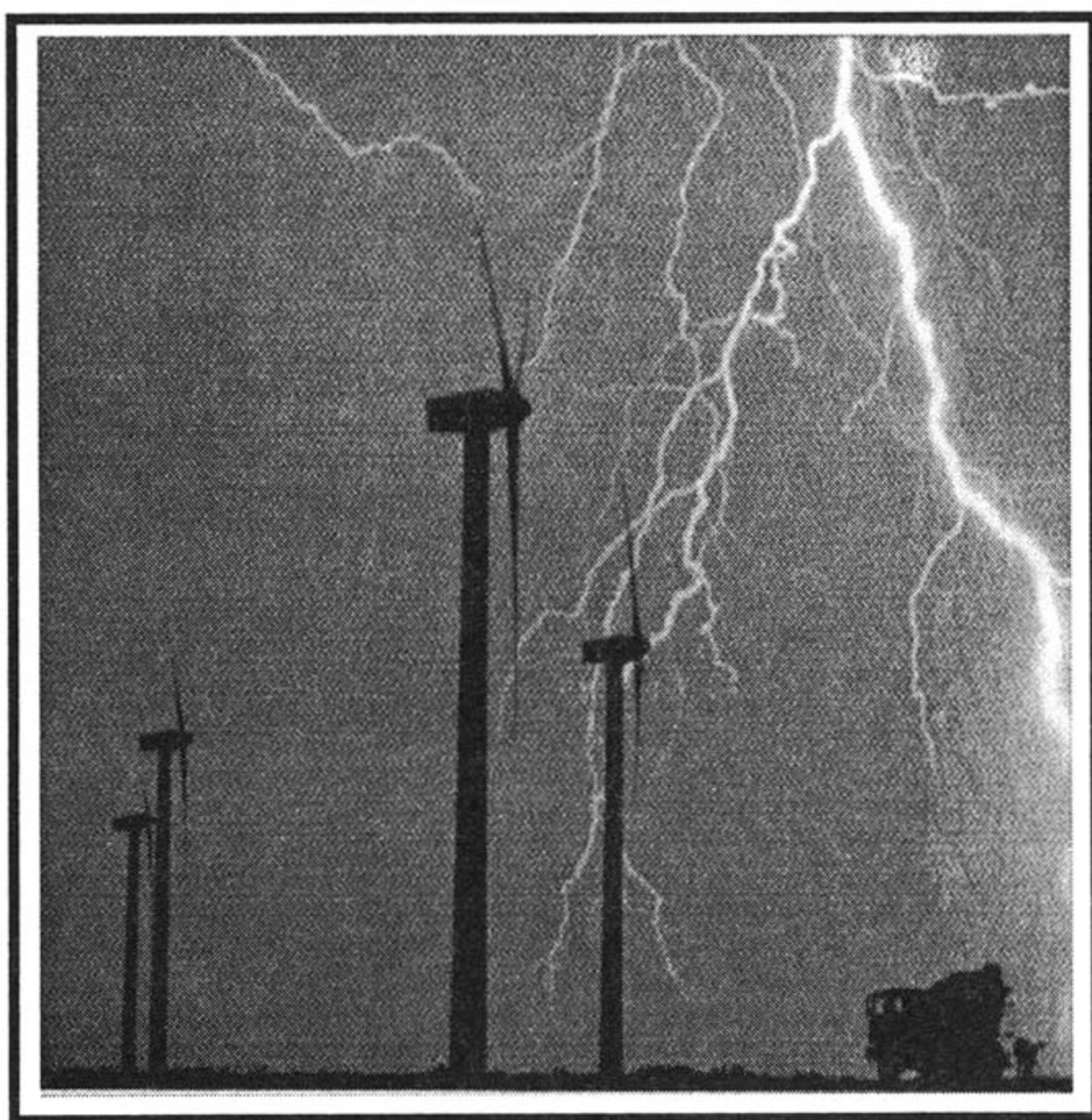


Pararrayos ESE y Puntas Franklin, con Espíritu de Aclaración



RESUMEN

Los pararrayos Franklin y los ESE (Early Streamer Emission) parecen competir entre sí, siendo la distancia de cebado el valor que los separa. Con el ánimo de hacer claridad se presenta en este trabajo una revisión de estudios y ensayos.

PALABRAS CLAVES

Rayos, Pararrayos, Protección.

ABSTRACT

The "ESE" and Franklin rods seem to compete between them. This paper presents a revision of studies and tests about these devices with no argument intention.

KEYWORDS

Lightning, ESE - Franklin Rods, Protection.

□ Blas Hermoso Alameda, Ph.D.
Catedrático de Ingeniería
Eléctrica, Universidad Pública
de Navarra, España.

□ Horacio Torres Sánchez, Ph.D.
Profesor Titular,
Universidad Nacional de
Colombia.

*Miembros del Comité CIGRÉ 33.01
Lightning*

1. INTRODUCCIÓN

La protección de estructuras contra el rayo se realiza mediante los sistemas de protección externa y los de protección interna, previa la valoración del riesgo a que pueden estar sometidas.

En los métodos empleados para la protección interna

(equipotencialización, distancias de seguridad, apantallamientos, empleo de descargadores) no ocurre lo mismo que con el sistema de protección externa en cuanto se refiere a la acción de las cabezas captadoras. Este es un tema de posiciones encontradas y en el que se maneja la existencia de normas como escudo para la defensa en el mercado de los diferentes conceptos, valiendo como ejemplo la posición mantenida por las IEC 61024 en las cuales el sistema de protección externa está fundamentado en las puntas Franklin y mallas, y las que mantienen las normas francesa NF C17-102 y la española UNE 21186, basadas en los dispositivos de cebado instalados en las puntas captadoras que establecen el aumento de la distancia de protección respecto a una punta Franklin, en función de su capacidad de producir antes la ionización del aire. Las diferencias no quedan solamente en el campo de los conceptos físicos, “ionización, efecto corona, avance de cebado, cebado” sino que se manifiestan también en las valoraciones del riesgo y en la selección de los niveles de protección, como ocurre con las normas francesa y la española, donde la segunda, que toma como referencia a la primera, no la sigue en su anexo B, en lo referente al cálculo de la frecuencia aceptable de rayos sobre una estructura (N_c), al ser los coeficientes (C) diferentes, lo que da lugar, en general, a que sean necesarios niveles de protección más bajos, menos distancia de cebado y por tanto, se requiere más cabezas captadoras.

El hecho de que la estimación del avance de cebado, en las normas francesa y española, se lleve a cabo mediante ensayos en laboratorios (anexos C) también es motivo de controversia, al considerarse que estos ensayos de laboratorio no representan la realidad del proceso de formación de la descarga ascendente positiva, proceso que ha sido motivo de los trabajos de numerosos investigadores con el establecimiento del concepto de campo de estabilización (campo ambiente mínimo que permite la propagación estable del líder ascendente positivo).

2. COMUNIDAD CIENTÍFICA INTERNACIONAL Y DISPOSITIVOS ESE

El fundamento de un terminal tipo ESE, como es conocido está en que es capaz de producir un líder ascendente un tiempo Δt (avance de cebado), antes que una punta convencional Franklin. Este incremento de tiempo multiplicado por la velocidad de líder descendente produce un ΔL que sumado a la distancia de cebado L que corresponde a la descarga descendente, obtenida por la expresión de CIGRÉ ($L=10I^{2/3}$), proporciona un radio de protección $L+DL$, superior al de una punta convencional (L). El avance de cebado se evalúa en laboratorios de alta tensión donde se simulan las condiciones naturales del rayo

mediante la superposición de un campo permanente que representa el campo ambiente existente en el momento de una tormenta y un campo de impulsos que simula la aproximación del trazador descendente.

Muchas son las cuestiones que este planteamiento deja sin respuesta, lo que ha dado lugar recientemente a manifestaciones como las realizadas por el comité científico del ICLP (International Conference on Lightning Protection) con motivo de la revisión de la norma NFPA 781 a trabajos como los llevados a cabo por Philippe Lalande, recogidos en su tesis doctoral [3] por Petrov N.I y Walters R.T. [4] [5] [6] ó a los trabajos de campo realizados por Eybert-Bérard A., Thirion B., Potvin C., Lanoie R., Lessard A., en la estación de Cachoeira Paulista [2].

2.1. Comité científico del ICLP (International Conference on Lightning Protection)

A finales de 1999, la NFPA (National Fire Protection Association) de Estados Unidos sometió a discusión de la comunidad internacional un borrador de reforma de la norma sobre protección contra rayos, NFPA 781, en la que se consideraba la inclusión de los terminales aéreos no convencionales (ESE) lo que dio lugar a una declaración negativa del Comité Científico ICLP de acuerdo con las siguientes consideraciones:

- La función sobre la que se basa un terminal tipo ESE nunca ha sido probada bajo condiciones de rayos naturales. Investigadores independientes no han sido capaces de demostrar las ventajas esperadas determinadas por pruebas de laboratorio; por el contrario, en pruebas comparativas, el terminal tipo ESE y la varilla tipo Franklin no muestran mayores diferencias tanto en las distancias de protección como en el número de impactos de rayo.

- El borrador de norma NFPA 781 no distingue claramente entre los diferentes tipos de descargas: “streamer”, líder frío y líder caliente, si las descargas son estables (autosostenidas), ó no (se extinguen) siendo estos conceptos de gran importancia pues cada uno de los tipos de descargas tiene sus propiedades en cuanto a corriente, campo eléctrico, velocidad, etc. Además, para la determinación del “tiempo de inicio del líder ascendente” en el laboratorio en relación con pruebas de diferentes tipos de varillas, las dimensiones mínimas especificadas son tan pequeñas que es difícil conocer el desarrollo del inicio del “streamer” de un líder frío y de un líder caliente, cuando se desarrollan en condiciones de descargas naturales.

- Las pruebas de laboratorio realizadas a escala no consideran la gran diferencia que existe con las

dimensiones reales de la naturaleza por lo que debido a estas diferencias y a la naturaleza no lineal de los diferentes fenómenos de la descarga, no es posible determinar en el laboratorio el desarrollo de un líder estable como se produce en la naturaleza.

2.2. National Institute of Standards and Technology

En 1999 el *National Institute of Standards and Technology* de los Estados Unidos llevó a cabo para la NFPA una exhaustiva revisión bibliográfica sobre los terminales ESE que fue publicada en Febrero del 2000 por la IEEE y en la que los autores, ante la dificultad del estudio, presentaron las siguientes recomendaciones:

- Dar prioridad al desarrollo de nuevos métodos para el cálculo o determinación de la distancia de impacto y las zonas de protección contra rayos relacionando las características más significativas desde un punto de vista estadístico.
- Continuar y extender las pruebas de laboratorio para investigar los efectos de los parámetros relevantes como la polaridad, carga espacial, viento y humedad sobre la iniciación probabilística y propagación entre los terminales ESE y los convencionales Franklin.
- Continuar las observaciones de rayos naturales en y alrededor de sitios de prueba con diferentes terminales donde la frecuencia de las descargas eléctricas atmosféricas sean muy altas.
- Compilar, analizar y centralizar los datos estadísticos existentes y nuevos sobre el desarrollo de la descarga eléctrica atmosférica en diferentes sitios y de diferentes fuentes.

2.3. Petrov, Walters

Estos autores, miembros del All Russian Electrotechnical Institute, Istra, de Moscú y de la Universidad de Wales, Cardiff, respectivamente, a lo largo de sus estudios, plasmados en los documentos [4], [5], [6] llegan a las siguientes conclusiones:

- La distancia de cebado depende de la geometría de la estructura y de la polaridad de las descargas.
- Representando las estructuras como semielipsoides, esferas ó cilindros se obtienen soluciones analíticas de la evolución de los campos eléctricos bajo la influencia de las descargas atmosféricas, deduciéndose la distancia de cebado como una función de los valores de las intensida-

des de las descargas, de la altura y del radio de curvatura de las estructuras, pudiéndose determinar un radio de curvatura óptimo que corresponde a la mayor distancia de cebado.

- Para estructuras tipo punta (pararrayos), dotadas con una esfera en su extremo, se deduce que la distancia de cebado depende del radio de la esfera; observándose, en ensayos de laboratorio, que la probabilidad de cebado es de 3 a 4 veces mayor cuando la estructura está dotada de una esfera de diámetro 50 cm, a cuando no la lleva, pudiéndose calcular como radio óptimo de la esfera (correspondiente a la mayor distancia de cebado) el valor de 0,7m.
- De los cálculos se deduce que la geometría de las estructuras tiene poca influencia en la distancia de cebado en el caso de descargas positivas mientras que no ocurre lo mismo para las descargas negativas.
- El área de captación y la probabilidad de impacto en estructuras altas y esbeltas depende de la altura de la estructura y del valor de la corriente. El ángulo de captación de las descargas no depende ni de la altura de la estructura ni del valor de la corriente y vale 52°.

2.4. Lalande P

Como indica en la introducción de su tesis doctoral [3], para abordar el problema de la protección de una estructura en el suelo hay que controlar la modelización de los dos precursores, descendente-ascendente y en particular el del líder ascendente positivo que es el que determina el punto de impacto.

En el análisis del factor de escala, en referencia a los ensayos que se pueden abordar en los laboratorios de alta tensión, concluye:

- A causa del factor de escala, los líderes no se pueden formar para el mismo campo ambiente E_0 , debiéndose aplicar campos ambientes E_0 más elevados para formar el líder, conforme la escala de la descarga atmosférica pero no pueden utilizarse para determinar, por una simple corrección de factor de escala, los campos ambientes necesarios para la formación del líder ascendentes en estructuras reales.

En la descripción de los diferentes ensayos llevados a cabo en el laboratorio, ONERA (French National Aerospace Research Establishment) y EDF (Electricité de France) (1989), para determinar la influencia geométrica del electrodo (perfil elipsoidal P_a = relación

entre eje mayor-eje menor altura) en la iniciación y propagación del líder ascendente positivo como en los llevados a cabo mediante disparos de cohetes en la campaña de 1995 en Camp Blanding (Florida) por CENG, EDF y ONERA, presenta las siguientes conclusiones:

- Para electrodos con iguales alturas, el que tiene el radio de curvatura menor ($P_a=25$), es el que tiene la mayor probabilidad de alcanzar el plano simulador de la nube.
- Cuando los electrodos tienen alturas diferentes, es el electrodo de mayores dimensiones el que provoca el mayor número de descargas en el aire constatándose que diferencias de 25 cm en las alturas dan lugar a que el 100% de los cebados se produzcan en el electrodo de mayores dimensiones, no pudiéndose compensar una pequeña diferencia entre las alturas con una disminución del radio de curvatura.
- El parámetro más importante en la geometría de un electrodo es su altura.
- Cuando la descarga positiva se propaga en el medio natural genera impulsos de una centena de amperios a intervalos de aproximadamente 20ms, fenómeno que no se había observado en los ensayos de laboratorio.
- La velocidad de la descarga ascendente, medida con la ayuda de cámaras y confirmadas por medidas electrostáticas (Laroche y otros, 1982), es del orden de 10^5 m/s (Golde 1975), valor superior al que se mide en los laboratorios.
- Los parámetros característicos del fenómeno natural (corriente, velocidad, ...), son muy superiores a los que se miden en el laboratorio. Los valores del campo eléctrico en el que evolucionan las descargas del laboratorio (del orden de 200 kV/m), y del medio natural (del orden de 40kV/m), conducen a modos de propagación diferentes.

Las consideraciones anteriores y el estudio de los modelos numéricos de la descarga ascendente positiva llevados a cabo por ONERA en colaboración con la Universidad de PADUA, le ha permitido establecer un nuevo criterio para el cebado de la descarga ascendente positiva, sobre la base del concepto que él llama campo de estabilización y que lo considera como el valor mínimo del campo eléctrico ambiente (E_{est}) que hay que alcanzar para que la descarga líder ascendente se propague de manera estable desde una estructura con la forma de un semielipsoide de altura H y radio de curvatura R_e , situada en un campo uniforme E_0 vertical, de manera que si:

- $E_0 < E_{est}$, la descarga avanza de manera inestable (avanza algunos pasos - no progresa).
- $E_0 > E_{est}$, la descarga avanza de manera estable (la velocidad de propagación de la descarga compensa el efecto de la carga espacial depositada en la

región corona de la cabeza, estando este equilibrio dinámico poco influenciado por el valor del campo superficial ionizante existente en el extremo del electrodo (E_{PC}), cifra que se obtiene a partir de la ley de Peek y del coeficiente amplificador del campo (k_{amp}), en el extremo de la estructura).

- En estructuras semielípticas, con radios de curvatura pequeños (hasta valores del orden de 30 cm), el campo de estabilización permanece prácticamente constante y superior al campo crítico ambiente E_{PC} , por lo que se produce la primera descarga corona pero la descarga no se desarrolla.
- En estructuras semielípticas con radios de curvatura mayores, el campo ambiente necesario para la formación del primer efecto corona es superior al de estabilización por lo que la formación de la descarga corona va asociada a una descarga estable.

2.5 Investigación "In situ"

Bajo este título los autores [2] han presentado un conjunto de pruebas llevadas a cabo en la estación de Cachoeira Paulista, situada a media distancia entre Sao Paulo y Río de Janeiro, construida en el centro del INPE (Instituto Nacional de Pesquisa Espacial), a 625 m de altitud, con coordenadas geográficas: S 22° 41,2: W 44° 59,0 y con un nivel ceráuneo entre 100 y 110.

Los ensayos se han llevado a cabo sobre cuatro tipos de pararrayos diferentes:

- Un pararrayos de punta aguda tipo Franklin ($r < 1$ mm)
- Un pararrayos de punta redondeada tipo Franklin ($r = 15$ mm)
- Un pararrayos tipo ESE
- Un pararrayos tipo ESE de alto rendimiento

Dispuestos sobre mástiles metálicos situados en los vértices de un cuadrado de 15m de lado, estando todas las puntas al mismo nivel del piso (12 m), cada bajante dotado de medidores de la corriente de la descarga ascendente, con una instalación de puesta a tierra común y habiendo sido sometidos a descargas naturales y artificiales. Se llegó a las siguientes conclusiones:

- Las condiciones han sido, de lejos, muy diferentes a las encontradas en Francia y USA.
- Las descargas artificiales con LRS-A han dado lugar a impactos en el suelo, a alguna distancia de los dispositivos de captura, no avanzando ninguna hipótesis para explicar esta situación pues el número de sucesos (4) ha sido pequeño.
- En las descargas artificiales se han constatado corrientes ascendentes sobre las instalaciones del dispositivo de cebado y la punta Franklin.

- Los vídeos muestran trazadores naturales ascendentes sobre el de dispositivo ESE.
- Hay que prever cuatro años de experimentación para establecer conclusiones definitivas.

3. CONCLUSIONES

- Para la distancia de cebado existen diferentes expresiones y consideraciones según los diferentes investigadores, siendo determinante la presencia de campos eléctricos formados por las cargas eléctricas en las nubes o las inducidas en las estructuras.
- El proceso de cebado va unido a la existencia de efecto corona pero la presencia de este efecto no implica que se produzca el cebado siendo necesaria la existencia de condiciones ambientales que permitan el avance de una descarga auto sostenida.
- Se requieren más investigaciones, tanto en laboratorio como "in situ" para comprender mejor y valorar los métodos de protección contra el rayo.
- Las normas muestran discrepancias que deben resolverse a la luz de los conocimientos científicos.
- Los elementos que forman los sistemas de protección contra el rayo deben soportar, al menos las corrientes de los niveles de protección para los que están diseñados.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1.] CIGRE 33.01(TF 03), *Lightning Exposure of structures and interception efficiency of air terminals*, April 1997.
- [2.] Eybert-Bérard A., Thirion B., Potvin C., Lanoie R., Lessard A., *Recherche in situ*, Foudre 2001, 15-16 Mayo 2001, Montpellier (Francia), pp.157-165.
- [3.] Lalande Ph., *Etude des conditions de foudroiement d'une structure au sol*, Thèse 9/98.
- [4.] Petrov N.I., Waters R.T., *Striking distance of lightning to earthed structures: effects of structure geometry*. International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 1999), P1-2393-2396, Londres 1999.
- [5.] Petrov N.I., Waters R.T., *Striking distance of lightning to earthed structures: effect of stroke polarity*. International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 1999), S11-2220-2223, Londres 1999.
- [6.] Petrov N.I., Petrova G.N., Waters R.T., *Determination of attractive-area and collection-volume of earthed structures*. International Conference on Lightning Protection (ICLP 2000), 374-379., Rodas (Grecia) 2000.
- [7.] Torres H., *¿Qué tan eficaces son los modernos dispositivos no convencionales de protección contra rayos?. El invento de la varilla pararrayos de Franklin sigue vigente después de 250 años*, Revista AEIUN, Bogotá, Julio 2000 ■

AUTORES



Blas Hermoso Alameda. Ingeniero Industrial, Especialidad Electricidad Industrial (1969), Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid.

Doctor Ingeniero (1995), Universidad Pública de Navarra. Ingeniero de cálculo y Jefe del Laboratorio de Ensayos de la División de Trans-

formadores de Potencia de Westinghouse S.A. Córdoba (España), 1970-1988.

Miembro del Comité CIGRE 33.01 (Lightning).

Catedrático de Ingeniería Eléctrica; Universidad Pública de Navarra.

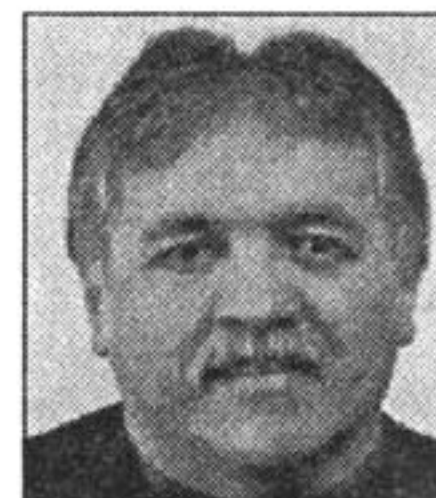
Campus Arrosadía, 31006 Pamplona (España).

tel.: +34 948 169277, fax; + 34 948 169281.

E-mail: hermoso@si.unavarra.es

Web: <http://www.unavarra.es>

Horacio Torres-Sánchez. Ingeniero Electricista., MSc. en Sistemas de Potencia de la Universidad Nacional Colombia, PhD Cnd. de la Universidad Técnica de Darmstadt (Alemania).



Fue Jefe de Diseño de Transformadores de Siemens (1975 a 1978). Ha

sido Director del Departamento de Ingeniería Eléctrica (1985-1990), Director del Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico CINDEC (1990-1994) y Vicerrector de Recursos Universitarios (1994-1998) de la Universidad Nacional de Colombia.

Actualmente es Profesor Titular de la Universidad Nacional de Colombia, Director del Instituto de Ensayos e Investigaciones de la Facultad de Ingeniería y Director del Programa de Investigación en Adquisición y Análisis de Señales – PAAS-UN.

Es Miembro activo y responsable del Comité CIGRE WG 33.01.02, Miembro de la IEEE y de la Academy of Science of New York.

Cuenta con seis libros e impresos universitarios y más de 60 publicaciones nacionales e internacionales en el área de Alta Tensión, transitorios electromagnéticos, descargas eléctricas atmosféricas y calidad de la energía eléctrica.

E-mail:

Web:

htorres@paas.unal.edu.co

<http://www.paas.unal.edu.co>