

► Las puntas agudas y romas de los pararrayos franklin y su efecto captor de los rayos a tierra

1. Introducción

En el apartado 2, consideraremos a las puntas electrizadas de los conductores eléctricos con sus cargas electrostáticas. En el apartado 3, estudiamos el desarrollo de las descargas eléctricas gaseosas llamadas “trazadores ascendentes” desde la tierra hacia las nubes tormentosas por medio de las puntas franklin (coronizadores o *streamers*, en inglés, y *leaders*) tanto las agudas como las romas (redondeadas). En el apartado 4 se encuentran las conclusiones sobre las puntas agudas y romas de las puntas franklin en la atracción de los rayos a tierra. En el anexo A, repasamos algunos conceptos de la ionización de un gas en cargas tanto positivas como negativas.

2. Las puntas electrizadas de los conductores eléctricos

El efecto de una punta electrizada se manifiesta, en primer lugar, por una pérdida continua de cargas eléctricas desde esa parte puntiaguda del conductor electrizado hacia el ambiente que la rodea.

Un conductor eléctrico aislado y colocado en una atmósfera gaseosa conserva su carga eléctrica total sin pérdidas de cargas sensibles durante muchas horas y aun días, si su superficie exterior no presenta ninguna aspereza. Al contrario: la presencia de una punta en el conductor se traduce en una disminución más o menos rápida de su carga eléctrica total. Por eso, los dispositivos de alta tensión

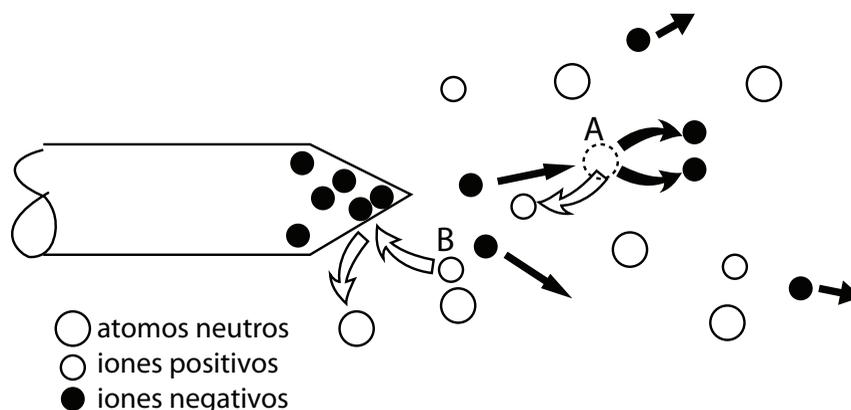


Figura 1. Mecanismo de la ionización gaseosa (del aire) en la vecindad de una punta con polaridad negativa.

En el punto A, se ioniza un átomo neutro por el choque de un ion negativo (o un electrón) muy acelerado (por el campo eléctrico de la punta). Se produce una multiplicación del número de iones positivos y negativos por avalanchas en la inmediata vecindad de la punta.

En el punto B, un ion positivo va a capturar sobre la punta un ion negativo (o un electrón) y se recombina en un átomo neutro. Así, globalmente, se ve una fuga de cargas negativas desde la punta hacia el gas.

emplean conductores de formas conductoras perfectamente lisas, tóricas o esféricas, para reducir al máximo las pérdidas de cargas eléctricas por el efecto de las puntas.

La atmósfera donde está sumergida la punta tiene una importancia considerable: se puede admitir que las moléculas gaseosas se ionizan en la vecindad de la punta: sea directamente (por contacto con la punta), sea por choque con los iones preexistentes y que están fuertemente acelerados por el intenso campo eléctrico que existe en la vecindad de la punta.

Una punta cargada negativamente está inmersa en un medio muy ionizado. Los iones positivos atraídos hacia la punta entonces trasladan a los electrones y se constata una fuga de electrones hacia la atmósfera. Los iones del mismo signo que la polaridad de la punta son rechazados por la punta en una corriente de aire negativa mientras que los iones positivos neutralizados por la punta (negativa) realimentan el mecanismo en átomos neutros (ver figura 1). Esta ionización intensa del aire es bien visible gracias a la luz violácea radiada por los átomos en esta zona muy perturbada.

Por otra parte, el movimiento de los iones produce un ruido característico.

3. Desarrollo de trazadores ascendentes tierra-nube (coronizadores) desde una punta franklin

Una punta franklin (pararrayos franklin, o cualquier otro objeto electroconductor puesto a tierra) cambia el campo eléctrico ambiental supuesto uniforme existente cerca de ese objeto o de ese pararrayos.

Por ejemplo, el campo eléctrico (E_p) en la cima de una punta franklin de radio (R_c) igual a un milímetro, colocada sobre una barra o en un mástil de seis metros de altura sobre el suelo, tendrá un valor 1.500 veces mayor que el campo ambiental (E_{amb}).

Es decir, que será un campo eléctrico igual a 1.500 campos ambientales para un radio igual a un milímetro y a una altura de seis metros.

Para otra punta franklin de diez milímetros de radio en la punta con la misma altura, seis metros, el campo eléctrico en la punta será de 230 campos ambientales.

Cuando el campo eléctrico en la punta es suficientemente intenso, el aire que rodea a la punta podrá sufrir una ruptura dieléctrica. Es decir, si el campo eléctrico es mayor o igual a 3.000 kV/m (a nivel del mar), el aire sufrirá su descarga eléctrica disruptiva.

El campo eléctrico en la superficie de la punta causará el movimiento de los iones y de los electrones libres en el aire circundante a la punta, creando una pequeña corriente eléctrica filamentososa de descarga disruptiva llamada "trazador ascendente" (coronizador).

En la tabla 1, presentamos los valores calculados del factor de intensificación β del campo eléctrico ambientado en las puntas franklin cilindro/semiesféricas (PFCSE), con las puntas semiesféricas de radios y altura sobre el suelo, calculados por el investigador Charles Moore (ver bibliografía).

Punta	Puntas franklin cilindro/semiesféricas (en la punta)		Factor $\beta = E_p/E_{amb}$
	Altura (m)	Radio (mm)	
A	6	1	1.500
B	6	10	230

Tabla 1. Puntas franklin cilindro/semiesféricas (PFCSE). Factores β de intensificación del campo eléctrico ambiental.

En la tabla 2, anotamos los valores del factor β del campo eléctrico disruptivo del aire ambiente (sobre el nivel del mar), E_{dp} igual a 3.000 kV/m, y del campo eléctrico necesario en la punta PFCSE para mantener al trazador ascendente punta-nube tormentosa (coronizador) que debe exceder el valor crítico de campo eléctrico igual a 440 kV/m.

El valor del campo eléctrico ambiental bajo una tormenta eléctrica es de 1,5 kV/m aproximadamente, cuando no se aproxima al ambiente un trazador descendente nube-tierra coronizador efectivo (TDNTCE, *lightning leader*).

Punta	Factor de intensificación β	Campos eléctricos (kVc/m)			
		Crítico disruptivo del aire	Ambientales disruptivos	De mantenimiento del trazador*	
				kVc/m	kVc/m
A	1.500	Edp = 3.000 en la punta	$E_{da} = 2 (E_{da} = E_{dp}/\beta)$	440	$\geq 0,3$
B	230	Edp = 3.000 en la punta	$E_{da} = 13 (E_{da} = E_{dp}/\beta)$	440	$\geq 1,9$

* Trazador (coronizador) ascendente punta-nube.

Tabla 2. Puntas franklin cilindro/semiesféricas. Factores β y campos eléctricos en la punta y ambientales correspondientes.

Con este campo eléctrico ambiental tormentoso de 5 kV/m, el campo eléctrico inducido y amplificado en la punta de un objeto conductor puntiagudo (o filoso) es suficientemente fuerte como para producir un trazador ascendente coronizador disruptivo (TACD, *breakdown streamer*). Sin embargo, cuando el trazador ascendente coronizador disruptivo se mueve desde el campo eléctrico intensificado en la punta hacia el ambiente, el campo eléctrico que encuentra pronto cae debajo del valor crítico de campo eléctrico igual a 440 kV/m necesario para mantener el trazador ascendente coronizador disruptivo y así, ese trazador desaparece. Los iones positivos dejados por el trazador ascendente coronizador disruptivo abortado reducen el campo eléctrico en la punta del objeto conductor tal que un nuevo trazador ascendente coronizador disruptivo no se desarrollará hasta que esa carga iónica espacial sea removida (por migración iónica en el campo eléctrico o por acción del viento, o bien, por un aumento en el campo eléctrico ambiental).

Cuando un trazador negativo descendente nube-tierra (TNDNT) se aproxima a la tierra, se intensifican los campos eléctricos ambientales inducidos en la tierra. Cuando el trazador negativo descendente nube-tierra alcanza una distancia crítica, el campo eléctrico entre la punta franklin y el trazador negativo descendente nube-tierra excede el campo necesario para inducir y mantener trazadores ascendentes positivos coronizadores disruptivos puede provocar su transición a un trazador ascendente coronizador disruptivo efectivo (TACDE, *leader* ascendente), con una corriente de varios amperes,

saliente de la punta franklin tal que se conecte al trazador negativo descendente nube-tierra y produzca el impacto del rayo en esa punta.

En la figura 2, hemos representado la intensidad del campo eléctrico ambiental (kilovolt por metro), modelo del vector campo eléctrico, alrededor de las puntas franklin A (radio de un milímetro, a seis metros de altura) y B (radio de diez milímetros, a seis metros de altura) suponiendo, por hipótesis, que se puede aproximar con la función $E_{amb} \cong E_{oexp} (-a x)$, siendo "x", la distancia entre la punta y el trazador negativo descendente nube-tierra que produce al campo ambiental capaz de crear el trazador ascendente coronizador disruptivo efectivo y así un rayo que impacte en la punta franklin.

La punta aguda A tiene una distancia crítica máxima D10 de aproximadamente 0,84 metros, y la punta roma (redondeada) B, de aproximadamente 2,3 metros.

Nota del autor: las distancias D10 (A) y D10 (B) son las distancias a las puntas A y B donde el campo ambiental de cada punta franklin tiene el 10% del valor máximo E_0 correspondiente a cada una.

4. Conclusiones

Vale hacer notar que el trazador ascendente coronizador disruptivo efectivo que puede emitir una punta franklin aguda (radio igual a un milímetro) pronto entrará dentro de una zona del campo distante de la punta cuya intensidad es muy baja como para sostener su propagación.

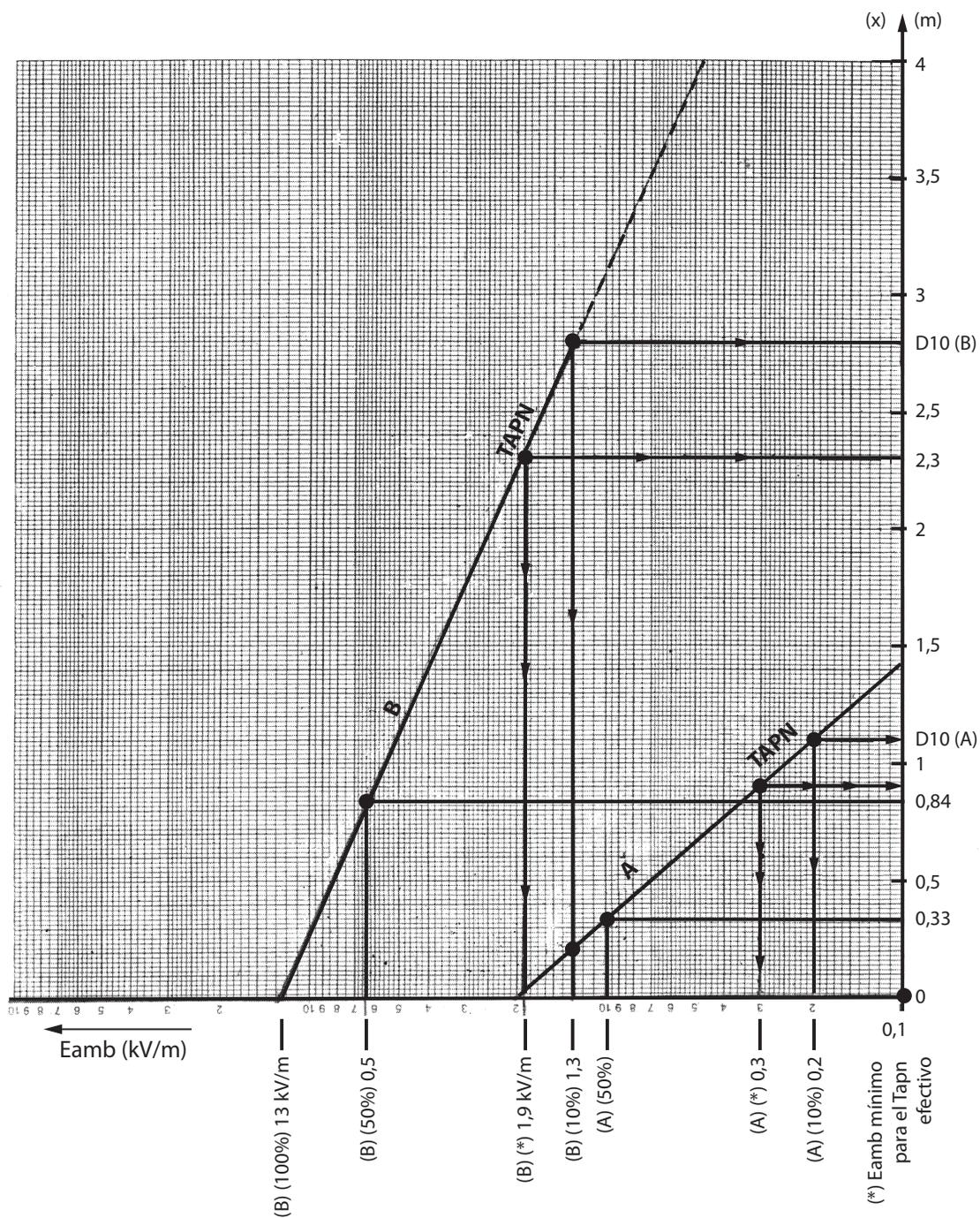


Figura 2. Puntas franklin de seis metros de altura: punta A de un milímetro de radio y punta B, de diez milímetros de radio. Campo eléctrico ambiental alrededor de las puntas: E_{amb} (kV/m) = $F(x)$, siendo "x" la distancia a la punta. TAPN, trazador ascendente punta-nube tormentosa.

Para el mismo valor del campo eléctrico ambiental, la intensificación del campo para una punta franklin roma (radio igual a diez milímetros aproximadamente) decrece mucho más lentamente que para una punta aguda (radio igual a un milímetro aproximadamente). Por lo tanto, será mayor la distancia crítica para la propagación sostenida del trazador ascendente punta-nube en el caso de una punta franklin roma (radio igual a diez milímetros aproximadamente). Esta circunstancia queda muy bien representada en la figura 2 por las pendientes de las rectas A y B.

En las figuras 3 y 4, recordamos las experiencias de Charles Moore.

Anexo A. Una idea del proceso de ionización de un gas

Las formas y las dimensiones de los electrodos (ánodo y cátodo) determinan la intensidad del campo eléctrico en un gas aislante situado en los dos electrodos y, por lo tanto, el esfuerzo dieléctrico dentro del aislante gaseoso.

Resulta de especial interés conocer cómo influyen sobre la ionización del gas tanto la forma del campo

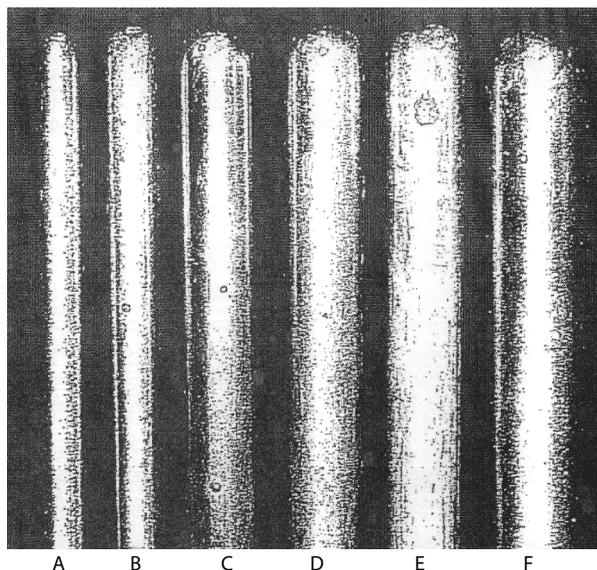


Figura 4. Fotografía de las seis puntas franklin de aluminio redondeadas que fueron impactadas por rayos (pico South Badly Peak, en Nuevo México, Estados Unidos, de 3.287 metros de altura) durante los veranos de 1996 a 2000. Las únicas puntas impactadas fueron las redondeadas. Diámetros: A y B, 12,7 milímetros; C, D y E, 19 milímetros, y F, 25,4 milímetros.

eléctrico como las formas de los electrodos.

En la figura A1, se indica el proceso de ionización de un gas en el caso de dos cilindros coaxiales, cuando el cilindro interior constituye el electrodo positivo (ánodo).

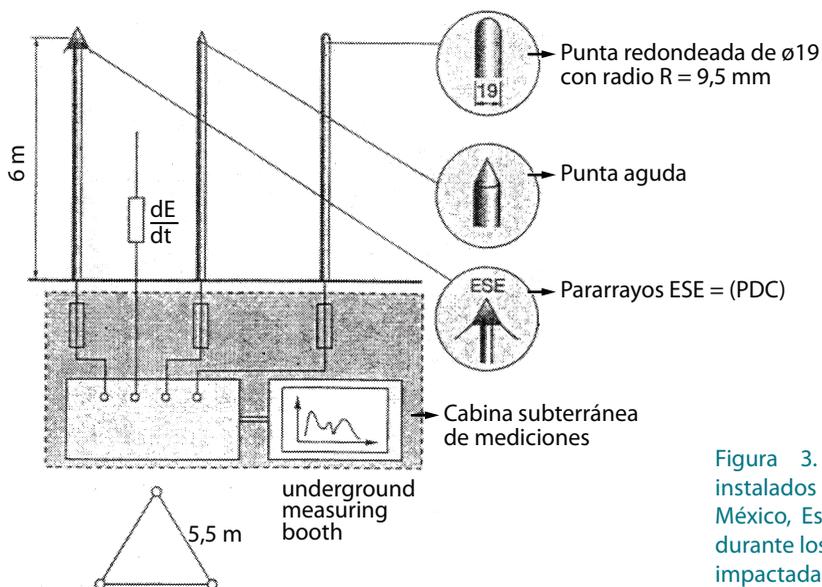


Figura 3. Mediciones realizadas en pararrayos instalados en el pico South Badly Peak, en Nuevo México, Estados Unidos, de 3.287 metros de altura, durante los veranos de 1996 a 2000. Las únicas puntas impactadas fueron las redondeadas.

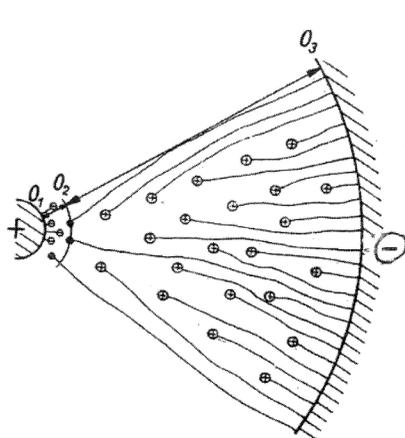


Figura A1. Ionización gaseosa entre cilindros coaxiales con el cilindro interior positivo (ánodo).

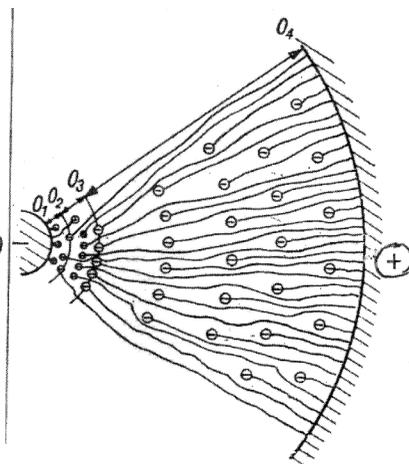


Figura A2. Ionización gaseosa entre cilindros coaxiales con el cilindro interior negativo (cátodo).

De O_1 a O_2 se extiende la zona de ionización, es decir, la zona en la cual se producen los choques de ionización a causa de la fuerte intensidad del campo. En la zona que va de O_2 a O_3 solamente existe un desplazamiento de iones, sin encontrarse más que iones positivos que se dirigen hacia el cilindro exterior negativo (despreciando, por su poca cantidad, los iones fortuitos). En cambio, en la zona O_1 a O_2 se encuentra, por efecto de la ionización por choque, tanto iones positivos como negativos.

En la figura A2, el cilindro interior constituye el electrodo negativo (cátodo). En este caso, los iones negativos y los electrones proceden del cilindro exterior. En la zona que va de O_1 a O_2 , se efectúa la ionización por choque debida a electrones y a iones positivos y negativos. En cambio, en la zona de O_2 a O_3 , la ionización por choque se efectúa únicamente por defecto de iones negativos y electrones, pues la intensidad de campo ya no es suficiente para la ionización de iones positivos. En la zona O_3 a O_4 , solamente existe un desplazamiento de iones negativos que se dirigen hacia el cilindro exterior.

Comparando las dos figuras, se observa que la ionización por choque (en igualdad de condiciones) es más intensa cuando la ionización se produce en el electrodo negativo que cuando se efectúa en el electrodo positivo.

La zona de ionización es tanto más amplia cuanto más elevada es la tensión entre los electrodos (es decir, su diferencia de potencial). ■

Bibliografía

- [1]. Beeren, Hans von, "Técnica de alta tensión", en La escuela del técnico electricista, Tomo XII, Labor, Buenos Aires, 1946.
- [2]. Berger, Gerard; Hadaji, Ramzi, "Lightning attachment physics – Experiments and modelling", conferencia en V SIPDA, San Pablo, 17 al 21 de mayo de 1999.
- [3]. Faircloth, Daniel Clarke, "Lightning protection of buildings using active finials", Instituto de Ciencia y Tecnología, Universidad de Manchester, Manchester, 1996.
- [4]. Kopecky, Vojtech, "Lightning protection systems with ESE devices under scrutiny", reimpresión de Elektropraktiker, Berlín 64, 2010.
- [5]. Moore, C.; Aulich, G.; Rison, W., "Responses of lightning rods to nearby lightning". Conferencia internacional sobre rayos y electricidad estática, Seattle, Washington. Warrendale, Pensilvania, 1 al 13 de septiembre de 2001,
- [6]. Rose, A. Jean; Penel, Charles, "Ionization des gaz-Pouvoir des pointes", en L'Electrostatique, la Revue du Palais de la Decouverte, número especial 6, París, 1976.
- [7]. Sidik, M. et al., "Study on the effectiveness of lightning rod tips in capturing lightning leaders", Universidades de Malasia e Indonesia, Springer Verlag, Berlín, Heidelberg, 2013.

Por Ings. Juan Carlos Arcioni y Jorge Francisco Giménez

IRAM - CITEDEF