

# Los rayos negativos descendentes a tierra y sus dos componentes: los trazadores descendentes (nube-tierra) y los ascendentes (tierra-nube) en la acción de los pararrayos protectores



Ing. Juan Carlos Arcioni  
 Ing. Jorge Francisco Giménez  
 Ingeniero Electricista (UBA)

Se reseñan algunos principios físicos de los rayos negativos descendentes de las nubes tormentosas eléctricas (los cumulonimbos) que generan un trazador negativo que sale de esas nubes hacia la tierra cuando vemos caer un rayo a un punto de la tierra, y también crean otro trazador positivo ascendente hacia esa nube por ese mismo canal iónico que formó en el aire, un instante antes, el trazador negativo descendente del cumulonimbos, que impactó en ese mismo punto de la tierra (punto de impacto). También analizamos las velocidades de esos trazadores descendentes y ascendentes, y presentamos un nomograma representativo de esas velocidades que fueron medidas experimentalmente y estudiadas por la CIGRE en su WG:C4.407 [3]. Estas velocidades tienen gran importancia en la técnica de la buena protección contra los rayos a tierra y sus efectos en las personas y los bienes materiales.

## La nube tormentosa: el cumulonimbos

Después de un cálido día de verano, por ejemplo, sobre la orilla del río o de un lago, el aire húmedo (más caliente en la cercanía del agua que en las masas de aire superiores de la atmósfera) forma una poderosa corriente ascendente de aire húmedo caliente. Esta corriente ascendente arrastra ese aire húmedo a una altitud elevada y provoca la formación de una nube de gran extensión vertical: el cumulonimbos, cuya cima o cumbre puede alcanzar una altitud de diez a once kilómetros (10 a 11 km), mientras que la base alcanza unos mil a mil quinientos metros (1.000 a 1.500 m) de alto. La parte superior de la nube está esencialmente formada de cristales de hielo mantenidos en suspensión (ver la

figura 1). Cuando aumenta el tamaño de estos cristales de hielo, sus pesos les provocan entonces una caída hacia la base de la nube. Durante esta caída, los cristales (cubitos) de hielo entran en contacto con las gotitas de agua ascendentes.

Los intercambios físicos en el contacto material de cubitos y gotitas fueron estudiados en el laboratorio y se observó que estos intercambios casi siempre son de transferencias de cargas eléctricas. Así, los cubitos de hielo se electrizan negativamente y las gotitas, positivamente.

Entre todos los mecanismos propuestos para explicar la transferencia de cargas entre cubitos de hielo y gotitas de agua aún no se ha podido elegir el mecanismo preponderante. Los cubitos de hielo

transportan a la base de la nube las cargas negativas, mientras que las gotitas se llevan la electricidad positiva (cargas electrostáticas) a la cima del cumulonimbos (ver figura 1).

Así, la base de la nube es negativa, tal como lo demostraron las mediciones efectuadas sobre las nubes tormentosas de los rayos negativos descendentes nube-tierra.

### El rayo y el relámpago

En el lenguaje común, se evoca con frecuencia "la caída del rayo". Del espectáculo mismo que ofrece el relámpago con sus numerosas ramificaciones dirigidas hacia la tierra, parece evidente que hay una progresión hacia el suelo a partir de la nube (Ver figura 2).

El relámpago en realidad posee una naturaleza compleja pero, con todo rigor, se tiene ahora con certeza que el relámpago que el ojo ve no nace en la nube sino muy cerca del suelo (¡y el relámpago remonta: vuelve a subir a la nube!).

El análisis en cámara fotográfica ultrarrápida ha permitido conocer paso a paso las fases sucesivas del relámpago (y del rayo). De hecho, el relámpago visible es precedido por un descenso de cargas negativas de la nube hacia el suelo, muy poco luminoso y que se cumple a trompicones. Esta primera descarga escalonada se llama "trazador a saltos", "trazador de flechas" o "trazador escalonado".

Una primera descarga sale de la nube, baja unos cincuenta metros hacia el suelo y después desaparece. Diez microsegundos ( $10 \mu\text{s}$ ) más tarde, una segunda descarga toma el canal y avanza a su vez hacia el suelo. Una sucesión de escalones crea así un canal de algunos centímetros de diámetro donde el aire está ionizado. El último trazo de flecha, entonces, se une a unos metros del suelo con otra descarga ascendente que sale de un objeto electroconductor saliente o prominente (pararrayos, árbol aislado, etc.). Se establece, entonces, el contacto eléctrico con el suelo y así se propaga hacia la nube una poderosa descarga de cargas negativas a partir del suelo muy positivo.

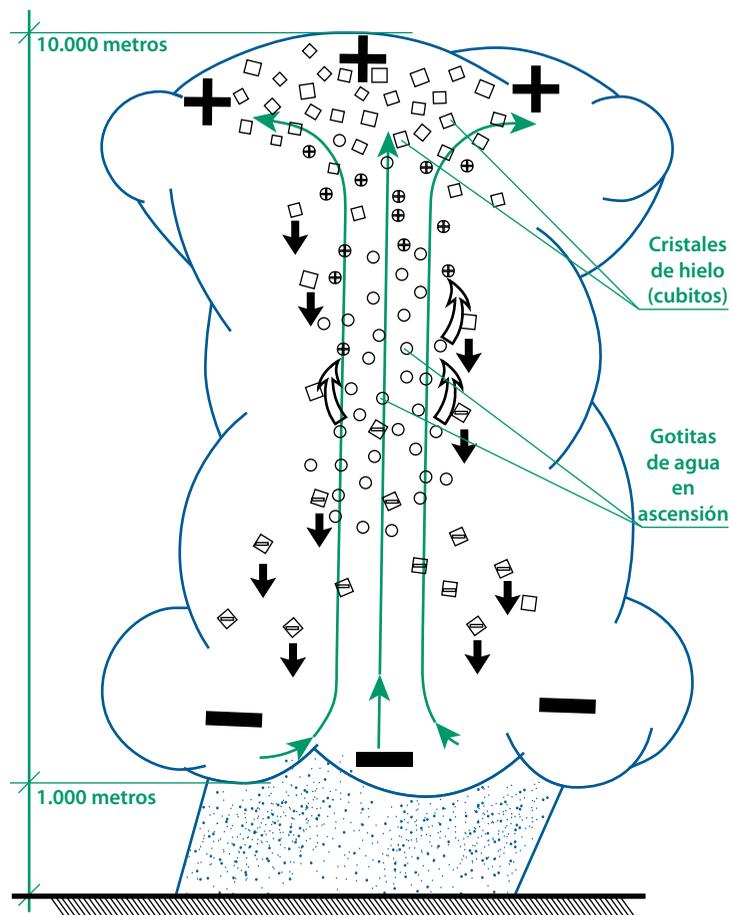


Figura 1. La nube cumulonimbus: una máquina electrostática

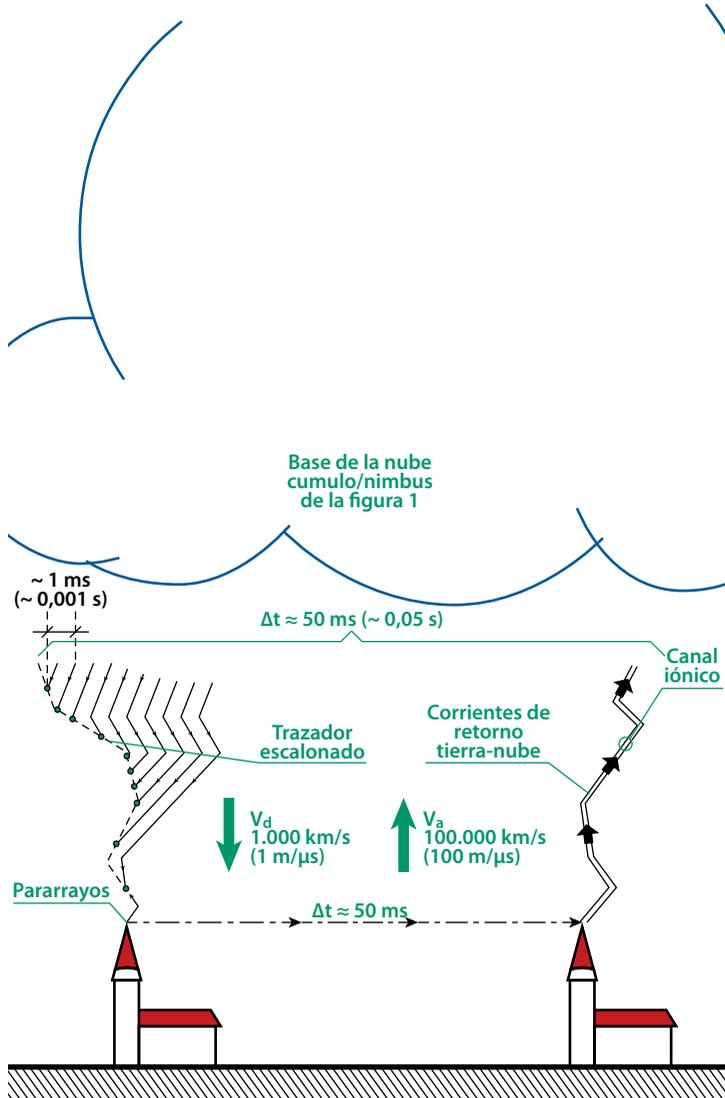


Figura 2. Caída del trazador por escalones sobre el pararrayos (izquierda) y ascenso de las corrientes de retorno (derechas desde ese mismo pararrayos hacia la nube por el canal iónico formado por el trazador por escalones)

Todo ocurre como si se asistiera a una subida de cargas positivas desde la tierra hacia la nube a una velocidad muy alta (unos cien metros por microsegundo —100 m/ $\mu\text{s}$ —). Esta corriente de retorno (tierra-nube) constituye el rayo propiamente dicho.

La duración total del fenómeno trazador por escalones y corriente de retorno es del orden de una centésima de segundos (0,01 segundos, es decir, diez milisegundos). Pero muchas veces ocurre que varias corrientes de retorno aparecen durante el mismo fenómeno y el conjunto de descargas puede, entonces, proseguir hasta una duración total de 0,2 a 0,5 segundos (doscientos a quinientos milisegundos —200 a 500 ms—).

### El proceso electrofísico de interceptación y de superposición de un trazador descendente nube-tierra

Este proceso electrofísico tiene las cuatro fases, que se describen a continuación.

La primera fase del proceso es una fase cuasi estática donde se crean campos eléctricos por debajo de una nube tormentosa. Estos campos eléctricos hacen que se exciten eléctricamente los objetos que están sobre la superficie del suelo y puedan emitir descargas por el efecto corona, según sean sus alturas y sus formas geométricas.

Así se crea una carga eléctrica espacial en el campo eléctrico inmediatamente cercano ubicado hacia arriba de cada objeto. Los iones de esta carga espacial ascienden con velocidades típicas de un metro por segundo (1 m/s) en campos de diez kilovolts por metro (10 kV/m) y crean alinealidades en el campo a alturas de varios centenares de metros. Por lo tanto, la intensidad del campo eléctrico observado a nivel del suelo se modifica antes de que ocurra algún evento dinámico con valores medianos a cincuenta kilovolts por metro (50 kV/m) que se reducen a valores menores a cinco cerca del suelo, tal como se ha registrado experimentalmente.

La segunda fase del proceso corresponde al acercamiento de un trazador descendente que es una descarga filamentosas que desciende desde la

nube hacia el suelo a velocidades medias del orden de 0,1 metro por microsegundo ( $0,1 \text{ m}/\mu\text{s}$ ) pero con pausas de veinte a cincuenta metros por microsegundo. La velocidades del trazador descendente entre dos pausas sucesivas pueden exceder el metro por microsegundo.

La convergencia de cargas hacia la tierra provoca un aumento exponencial de la intensidad del campo eléctrico que se observa en puntos a tierra. Es decir, hay un pequeño cambio inicial en la intensidad del campo eléctrico observado en la tierra cuando el trazador el trazador está a gran altitud pero, cerca del encuentro con la tierra, los valores del campo eléctrico crecen a razón de un kilovol-metro por microsegundo ( $1 \text{ (kV/m)}/\mu\text{s}$ ) aproximadamente de velocidad de aumento de ese campo.

La tercera fase ocurre cuando las intensidades del campo eléctrico ambiental alcanzan el valor crítico necesario para crear la disrupción dieléctrica del aire por avalanchas (iónicas y/o electrónicas) que se originan a partir de un efecto corona en la punta del pararrayos (o de cualquier otro cuerpo u objeto de la tierra).

Este efecto corona inicial puede llegar hasta provocar la emisión de un trazador corona y, finalmente, al desarrollo de un trazador ascendente efectivo que se desarrolla desde la tierra hacia la nube, en una transición crítica del trazador ascendente estable que tiene lugar unos dos metros arriba del pararrayos o lugar de impactos efectivo del rayo a tierra, tal como se comprobó experimentalmente (ver figura 2).

La cuarta fase del proceso es la propagación continuadora del trazador ascendente estable efectivo que partió desde el presunto punto de impacto (o punto de impacto virtual) hacia la nube (ver figura 2, a la derecha).

La aptitud de intercepción de un trazador ascendente lanzado desde un pararrayos (o desde otro punto de impacto virtual de un rayo a tierra) hacia la nube tormentosa depende de la relación ( $R_v$ ) entre las velocidades de todos los trazadores descendentes ( $V_d$ ) que convergen en el punto de impacto

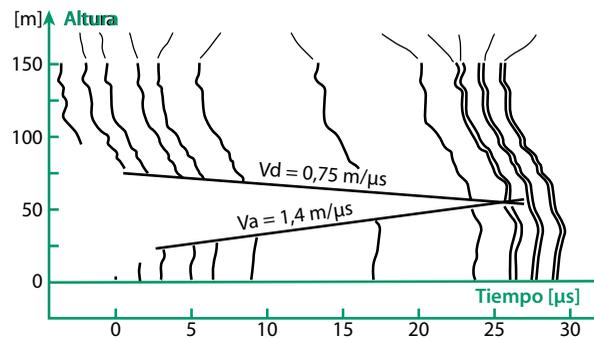


Figura 3. Impacto de rayo a tierra tal como fue registrado en Japón con el sistema ALPS del CRIEPI (1990) [2].  $V_a$  es la velocidad del trazador ascendente tierra-nube de polaridad positiva;  $V_d$ , la velocidad del trazador descendente nube-tierra de polaridad negativa:  $R_v = V_d/V_a = (0,75 \text{ m}/\mu\text{s}) / (1,4 \text{ m}/\mu\text{s}) = 0,54$

virtual, con respecto a la velocidad ( $V_d$ ) del trazador ascendente que emerge del mismo punto.

Por lo tanto, cuando comienza la propagación del trazador ascendente que sale de un punto de impacto virtual hacia la nube tormentosa, la relación  $R_v = V_d/V_a$  entre las velocidades de todos los eventuales trazadores descendentes que convergen hacia un punto de impacto virtual y la velocidad del trazador ascendente que emerge de allí al posible encuentro con alguno de esos trazadores convergentes, deben ser tales que sea  $R_v = V_d/V_a \leq 1$ , que es la que determina el efectivo radio de atracción de un pararrayos (o de otro punto de un objeto puesto a tierra, por ejemplo, vértices de triedros de paredes, cúpulas, agujas arquitectónicas y ejes de diedros de paredes, barandas metálicas, bordes, etc.).

En la figura 3 reproducimos una fotografía del proceso espacio-temporal de caída de un rayo en Japón [2], en donde  $V_d/V_a = (0,75 \text{ m}/\mu\text{s}) / (1,4 \text{ m}/\mu\text{s}) = 0,54$

### Las velocidades de los trazadores ascendentes y de los trazadores descendentes en la formación de los rayos a tierra negativos descendentes

En el apartado anterior tratamos la cuarta fase del proceso electrofísico de intercepción y de superposición de los trazadores ascendentes y descendentes que forman un rayo a tierra negativo descendente que cae sobre un pararrayos (o cualquier otro punto a tierra).

Con casi todos los datos de las velocidades disponibles en la bibliografía internacional [3], hemos preparado el nomograma de la figura 4.

En un papel bibliogarítmico hemos representado en las ordenadas a las velocidades  $V_d$  (m/μs) en función de las velocidades  $V_a$  (m/μs), en las abscisas.

En la recta punteada se representa la igualdad  $V_d = V_a$ , cuya pendiente es de 45 grados. A continuación, siguen las tres rectas paralelas a  $V_d = V_a$ , que son ejemplos de la condición  $V_d = V_a$  que tratamos en el apartado anterior, siendo  $V_d/V_a \leq 1$ . Son las siguientes:

- »  $V_d = 0,5 V_a$
- »  $V_d = 0,1 V_a$
- »  $V_d = 0,01 V_a$

En las abscisas marcamos las velocidades medidas mínima (5 m/μs) y máxima (360 m/μs); así como los promedios ponderados de las mínimas (27 m/μs), medias (111 m/μs) y máximas (246 m/μs) de las velocidades medidas [3].

### Conclusiones

En primer lugar, según nuestro conocimiento, todavía no se ha publicado una función  $V_d = F(V_a)$ , según la bibliografía que pudimos consultar.

En segundo lugar, en nuestro nomograma de la figura 4, como ejemplo, hemos representado las funciones lineales  $V_d = kV_a$  para  $k = 1$  (la igualdad  $V_a = V_d$ ) y para  $k = 0,5$ ;  $k = 0,1$ , y  $k = 0,01$ , que elegimos y que cumplen con la desigualdad  $V_d < V_a$ .

Marcamos las abscisas  $V_a = 5$ ; 27; 11; 246, y 360 m/μs, que son todos los valores medidos

experimentalmente con los promedios ponderados para los tres centrales de los cinco marcados de las  $V_a$  mínimas, medias y máximas (según [3]).

En tercer lugar, cuando se publique una función  $V_d = F(V_a)$ , estará comprendida dentro de nuestro nomograma de la figura 4 y se podrá dibujar entre la recta  $V_d = V_a$ , el eje de abscisas  $V_a$  y el eje de ordenadas  $V_d$  dibujado a la derecha.

### Bibliografía

- [1] Penel, C., Rumebe, G., "L'Electrostatique au Palais de la Découverte", en *L'orage et le paratonnerre, Revue du Palais de la Découverte*, 1976, París
- [2] Arcioni, J. C.; Giménez, F., "Los mecanismos electrofísicos de impacto de un rayo negativo descendente de una nube tormentosa hacia la tierra", en *Ingeniería Eléctrica 282*, Editores SRL, Buenos Aires, Noviembre 2013
- [3] CIGRÉ Working Group C4.407. Technical brochure 549: "Lightning parameters for engineering applications", CIGRE, Suiza, Agosto 2013

Nota de los autores. **In Memoriam.**  
**A la feliz memoria de nuestro querido amigo y colega Ing. Ángel Arsenio Reyna (1934-2018).**

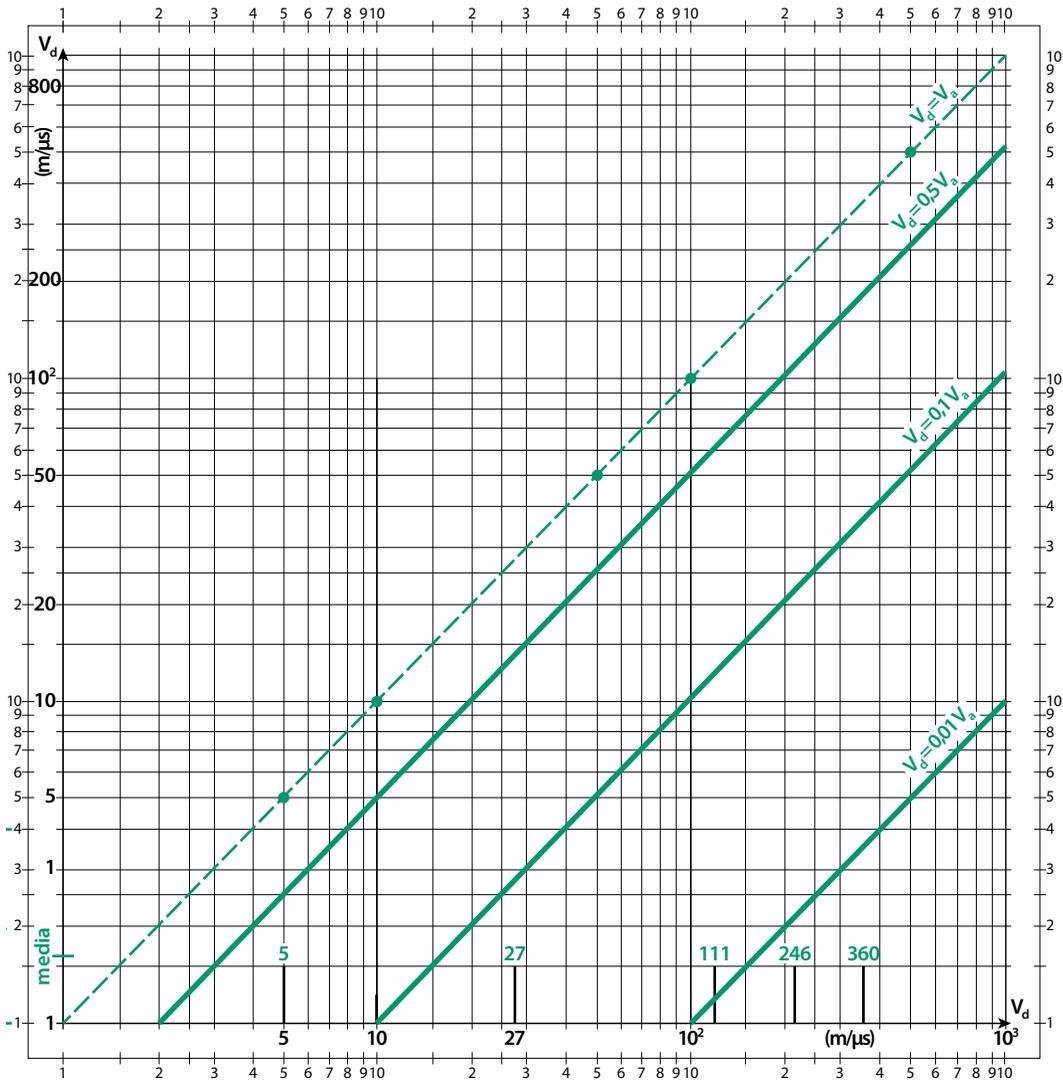


Figura 4. Nomograma de las velocidades  $V_d = F(V_a)$ , siendo:

- » en las abscisas,  $V_a$  (m/μs) los módulos de las velocidades de los trazadores negativos ascendentes (de la tierra hacia la nube);
- » en las ordenadas,  $V_d$  (m/μs) los módulos de las velocidades de los trazadores positivos descendentes (de la nube hacia la tierra).

Nota:  $V_a$  y  $V_d$  corresponden a los rayos negativos descendentes naturales. Las velocidades  $V_a$  marcadas son:

- » 5 m/μs, valor mínimo medido
- » 27 m/μs, promedio ponderado de las velocidades mínimas medidas
- » 111 m/μs, promedio ponderado de las velocidades medias medidas
- » 246 m/μs, promedio ponderado de las velocidades máximas medidas
- » 360 m/μs, valor máximo medido