

## “EVOLUCIÓN DE LA NUBE DE TORMENTA Y ESTABLECIMIENTO DEL RAYO”

Elaborado por: *Ing. Frank Amores Sánchez,  
Especialista PCI, APCI.*



Para comprender mejor el funcionamiento y lograr un diseño más eficiente de un sistema de protección contra el rayo se necesita hacer un repaso de procesos físicos relativos a este fenómeno natural: desde la formación y desarrollo de la nube de tormenta hasta el establecimiento del rayo.

### **Proceso de desarrollo de la nube de tormenta:**

Una tormenta tiene un tiempo de formación entre media y dos horas. Haciendo un análisis temporal, este proceso puede dividirse en tres fases:

1º. Formación de la nube de tormenta. Cuando se encuentran dos masas de aire con temperatura e hidrometría diferentes, existen las condiciones favorables para el nacimiento de tormenta. La masa de aire húmedo que se encuentra a nivel del terreno es calentada por la irradiación solar intensa. Este aire se vuelve menos denso y asciende hasta llegar a las capas de la atmósfera de su misma densidad que en la región más alta se caracteriza por la presencia de capas de aire frío. Durante la ascensión, esta masa de aire se enfría, condensa y produce vapor de agua, liberando el calor latente que mantiene la temperatura interna de la nube por encima de la del ambiente exterior (dando lugar a la actividad de convección de la tormenta). La presión y la temperatura en su interior son tales que el movimiento vertical del aire se hace mantenido. La velocidad de ascenso de la nube aumenta y su dimensión en la dirección vertical crece hasta que toda la masa se encuentra en desequilibrio térmico con el aire que la rodea.

2º. Maduración de la nube. Proceso en el cual se expande hasta alcanzar una altura desde su centro entre 9 y 20 km, de acuerdo con la latitud del lugar, y un diámetro de 5 - 10 km. Este movimiento de ascensión culmina cuando la masa de aire llega a las capas bajas de la estratosfera, donde se encuentra con fuertes vientos corren en otras direcciones y la nube toma forma de yunque de herrería, conocida como “cúmulo-nimbos”. Cuando el aire ascendente llega a la zona de granizo y comienzan a formarse gotas de agua. Estas no caen inmediatamente al suelo, debido a que las ráfagas de aire de unos 120 km/h las sostienen, sino que crecen hasta alcanzar un tamaño tal que las corrientes verticales ya no pueden sostenerlas, produciéndose entonces las precipitaciones. Para que la nube sea capaz de generar descargas eléctricas es necesario que alcance una profundidad de 3-4 km.

3°. Disipación de la nube. La precipitación genera ráfagas descendentes de aire frío que van envolviendo a la célula tormentosa, dando lugar a la disipación cuando esta pierde la humedad que contenía, por lo que no cesa la transferencia de calor latente hacia su alrededor, disminuye la temperatura y no se producen las corrientes ascendentes ni a la formación de agua e hielo.

Véase ahora el proceso electrostático que ocurre en la nube de tormenta:

▪ Electrificación de la nube de tormenta:

Para que el rayo ocurra, se requiere que la nube esté electrificada. La electrificación ocurre como resultado de la formación dentro su seno de regiones de carga eléctrica de signos opuestos. Los factores principales para la ocurrencia de la separación de cargas electrostáticas son la presencia simultánea de partículas pesadas y ligeras y la fuerza de los vientos ascendentes (cuya velocidad puede superar los 25 m/s). En las zonas de fuertes turbulencias, las partículas chocan entre sí. Las colisiones entre los cristales de hielo (entre -30 y -40° C), que adquieren carga positiva, y las partículas más calientes de granizo blando (entre -10 y -20 ° C), que adoptan carga negativa. Las cargas positivas más ligeras se desplazan a mayores altitudes y las cargas negativas más pesadas se mantienen en la base de la nube. Por esta razón más del 90% de las descargas de nube a tierra son de tipo negativa. Esta electrificación es relativamente rápida; una nube pasa del estado neutro al de electrificado en sólo unos pocos minutos. Desde el punto de vista electrostático la nube se comporta como un dipolo vertical en el cual la parte superior, tiene carga positiva (de decenas a centenas de Coulomb) y la inferior adquiere carga negativa (del mismo orden de magnitud).

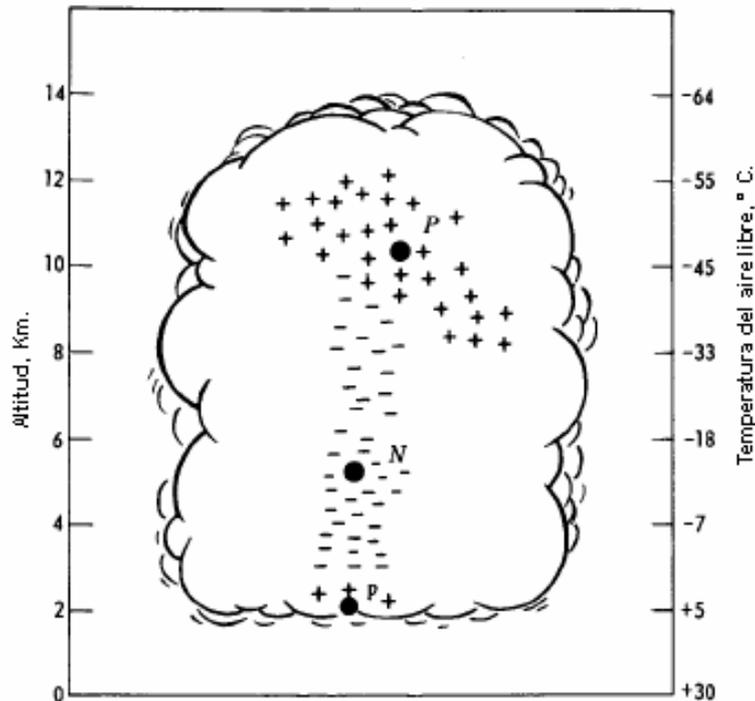


Fig. 1 Distribución probable de cargas en la nube de tormenta, de acuerdo a Malan

Mientras se está generando la carga en la base de nube, el campo electrostático induce una carga en la superficie del terreno debajo de ésta de igual potencial pero de signo opuesto. Es muy probable que la sombra eléctrica tenga la misma forma y tamaño que la nube y se desplace junto con esta.

▪ Elevación del campo eléctrico:

El campo eléctrico vertical inducido en la superficie del terreno pasa desde el valor de *buen tiempo* (-120 V/m), antes de que la nube de tormenta se presente, hasta valores de 10 á 20 kV/m, cuando está totalmente electrificada. El valor del campo eléctrico en el aire decrece exponencialmente con la altura, mientras que el potencial con relación a tierra crece hasta una altura de aproximadamente 50 Km, donde se hace constante y mantiene esta zona inferior de la ionosfera (electrosfera) a un potencial de unos 300 kV. Con ello, el conjunto ionosfera - tierra se asemeja a un condensador esférico, donde la superficie de la tierra tiene una carga negativa de 1 MC, la ionosfera una carga positiva de igual valor y la capa de aire hace de dieléctrico.

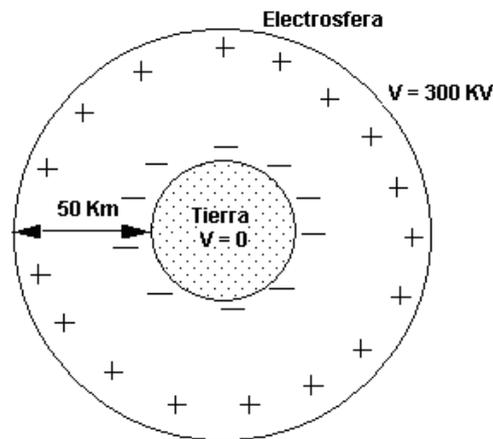
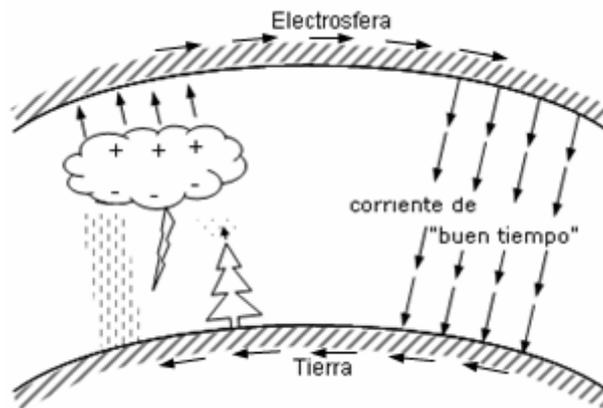


Fig. 2 Condensador eléctrico terrestre

La densidad de corriente eléctrica en la atmósfera es alrededor de  $10 \mu\text{A}/\text{m}^2$  en la dirección paralela a la tierra. Ésta es producida por el campo eléctrico y, dado que el aire es conductor, esta corriente pasa de la atmósfera a la tierra.

La conductividad de la atmósfera se debe a la existencia de iones que se desplazan en el campo. Esta ionización por unidad de volumen, que aumenta con la altitud, es producida fundamentalmente por rayos cósmicos, pero también por adopción de carga de las partículas de polvo que flotan en el aire y los cristales de sales debido al choque de olas marinas. Por lo tanto, la conductividad del aire es variable y en consecuencia también varía su potencial.

Este proceso transcurre en unos 7 minutos como promedio, habiendo una corriente de fuga alrededor de 1350 A. Si sólo existiera esta corriente, la tierra se descargaría aproximadamente en media hora. Como el valor del campo es permanente, tiene que existir un mecanismo de carga que compense dicha fuga. Esta compensación se produce mediante unas 1000 á 2000 tormentas diarias, con corrientes tierra - ionosfera de 0,5 a 1 A, que de manera continua, aportan una corriente total entre 500 a 2000 A. Por tanto, las nubes de tormentas constituyen los generadores que aportan la carga negativa a la tierra para de este modo mantener la diferencia de potencial entre la ionosfera y la tierra.



*Fig. 3 Circuito eléctrico global*

- Formación de los líderes de paso:

Cuando el campo eléctrico desarrollado excede cierto valor comienza la ionización. Esta ionización local puede posteriormente convertirse en un líder descendente o intra-nube.

Al alcanzar el potencial en la nube aproximadamente unos 100 MV, se forman chispas de baja intensidad que se mueven hacia la tierra con arranques y paradas sucesivos, o sea, en forma de "líderes de pasos". La velocidad de movimiento de estos líderes está entre  $1 \cdot 10^5$  y  $3 \cdot 10^6$  m/s y la duración de las paradas es de 20-50 ms. Este líder descendente comienza en una determinada región de la nube cargada negativamente y se dirige hacia tierra, depositando las cargas negativas en el aire que rodea su canal. (La carga del líder descendente puede ser positiva, pero esto no afecta su comportamiento en términos de atracción).

- Aproximación del líder descendente:

En la medida que cada líder se aproxima a la tierra, el campo eléctrico entre ambos se eleva rápidamente y la tensión entre el extremo de ese líder y la superficie del terreno va generando una acumulación de cargas espaciales de signo opuesto en el entorno cercano a los objetos en el terreno. La intensidad y velocidad de crecimiento del campo depende de la magnitud de la carga que es dirigida a la tierra por el líder descendente y la velocidad de descenso de su extremo.

El movimiento de la cargas hacia la tierra provoca un incremento exponencial de la intensidad de campo en las protuberancias sobre la misma. O sea, el cambio inicial de la intensidad de campo eléctrico en la tierra cuando el líder está a una gran altitud es muy pequeño, pero cuando la aproximación es grande, estos valores aumentan a razón de  $10^9$  V/(m.s).



## APCI

Para una velocidad promedio del líder descendente negativo de  $0,5 \cdot 10^6$  m/s y una altura de la nube de 2 km, el tiempo requerido por el campo eléctrico en la punta a tierra en crecer desde prácticamente cero hasta el instante de la posible intercepción, puede ser de 500  $\mu$ s. Realmente, la velocidad de un líder descendente disminuye de modo progresivo en la medida que su extremo se va aproximando a tierra.

- Descarga corona:

En cuestión de unos pocos milisegundos, la tensión electrostática va desde unos cientos de miles de V hasta más de un millón de V (el campo alcanza unos 10 kV/m). Cuando la intensidad de campo eléctrico alcanza el valor crítico provoca una irrupción de iones en avalancha de los objetos en la tierra, llamada descarga corona. La antelación con que lo hagan depende de la altura y forma geométrica de dichos objetos.

- Emisión del líder ascendente:

Inmediatamente después se produce la emisión de trazadores ascendentes, o sea, la ascensión de iones a una velocidad típica de 1 m/s y se crean no linealidades del campo eléctrico hasta alturas de varios cientos de metros. Esto sucede cuando el extremo inferior del líder descendente está entre 100 y 300 m del terreno o de los objetos enclavados en este. Pueden emitirse varios líderes ascendentes, pero usualmente sólo uno logra alcanzar al líder descendente.

- Propagación continua del líder ascendente:

Desde el punto de vista físico, para que un trazador ascendente continúe su progreso hacia el extremo del líder descendente tiene que ser capaz de obtener la energía suficiente del campo eléctrico para hacerlo. La condición para obtener dicha energía está directamente relacionada con el campo promedio entre el extremo del líder descendente y la punta que emite el trazador ascendente.

Finalmente, a la distancia de un paso de la tierra se establece una “zona de impacto” que es un espacio ficticio de forma semiesférica con radio igual a una longitud de paso y que contiene a los puntos con igual probabilidad de terminación del rayo. Como los edificios y estructuras acortan la distancia de aire entre la nube de tormenta y la tierra, son preferentemente impactados por el rayo.

Se han realizado múltiples investigaciones con la finalidad de conocer con mayor precisión el lugar de terminación de líder de paso. Parece ser que este es una función de dos factores definibles:



## APCI

El *Punto de Discriminación* es posición espacial ocupada por el extremo inferior del líder descendente que determina el punto de impacto y, por tanto, la trayectoria del primer líder ascendente va a su encuentro. Es también el punto de inicio del último paso. Por tanto, el punto de discriminación está a un paso completo de la tierra y a esta distancia se le llama “distancia de impacto”.

La *Distancia de Impacto* es la longitud de la trayectoria entre el punto de discriminación y cualquier terminación potencial de impacto. Puede considerarse también como la máxima distancia horizontal entre el extremo del líder y la terminación de impacto. La distancia de impacto y la longitud del paso son aproximadamente del mismo valor. Ambas son cantidades estadísticas que dependen de la intensidad del impacto del rayo resultante. Nótese que estos pasos y las distancias de impacto, varían de aproximadamente de 10 hasta más de 200 m. La longitud promedio para el impacto negativo, que es el más común, es de unos 20 m. Para un impacto negativo, esta distancia excede los 45 m de longitud.

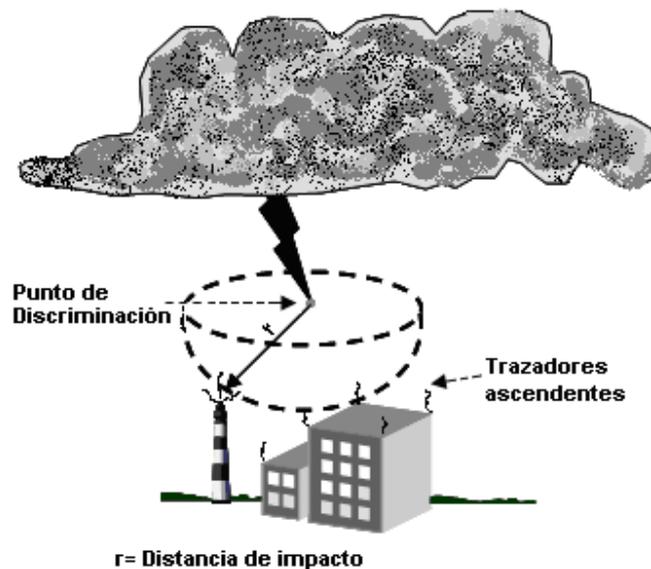


Fig. 4 Relación entre el punto de discriminación y la distancia de impacto

Después que el líder alcanza el punto de discriminación, ya está determinado el punto de impacto. Antes de este momento, la trayectoria es aleatoria e irrelevante. Por lo tanto, solamente están en riesgo los objetos que se encuentran dentro de la zona de impacto. Una torre puede estar justo fuera de la zona de impacto y no recibirlo, mientras una brizna dentro de ésta puede ser impactada. Este fenómeno ha sido observado en tormentas.

La única excepción posible a la regla del punto de discriminación sucede cuando el canal del líder pasa muy cerca de una estructura alta que tiene discontinuidades



## APCI

agudas. La proximidad de un campo eléctrico elevado a una estructura puede provocar que el potencial de esta se eleve lo suficiente como para estimular a que ese punto agudo pase al modo trazador. Entonces este puede “extender el brazo”, hacer que el líder cambie bruscamente su trayectoria y capturarlo.

En el proceso de establecimiento del rayo es crítica la relación entre las velocidades de los líderes ascendente y descendente que van al encuentro. Esto quiere decir que un líder descendente rápido puede ganarle trayecto a un líder ascendente lento y reducir significativamente la capacidad de intercepción del punto que lanza dicho líder ascendente. Por lo tanto, una vez que comienza la propagación la relación entre las velocidades de los líderes establece el intervalo efectivo de captura. Un líder competitivo puede lograr la intercepción si se encuentra dentro de un intervalo de igual probabilidad cuya magnitud está determinada por esta relación de velocidades.

Además de los factores anteriormente citados, existen otros relacionados con las intensidades mínimas de campo eléctrico necesarias para provocar la ruptura del aire y para aportar la energía suficiente que asegure la propagación del líder ascendente. Normalmente estos valores son de 3 MV/m y 500 kV/m, respectivamente. El rayo ocurre cuando se excede la rigidez dieléctrica del aire y, por consiguiente, éste no puede actuar más como aislador.

### **Proceso de establecimiento del rayo**

La neutralización de cargas es el flujo de electrones de un cuerpo eléctricamente cargado a otro, tal que se anule diferencia de potencial existente entre estos. En esta fase se transporta gran cantidad de carga en un tiempo muy pequeño y la energía electrostática se transforma en energía electromagnética.

Tanto las descargas de entre nubes como las entre nube y tierra producen la neutralización de cargas: en un caso, entre los centros de carga positivos y negativos de nubes distintas y, en el otro, entre los de la nube y del terreno.

En las descargas entre nube y tierra puede distinguirse cuatro tipos: las descendentes (de nube a tierra) y las ascendentes (de tierra a nube), atendiendo a la dirección del movimiento de las cargas entre estas así como las positivas y las negativas, en función de la polaridad del líder que inicia la descarga. Esta clasificación fue establecida por Berger en 1978.

En el caso de las descargas descendentes, el líder de descarga que se dirige hacia tierra guía la descarga del rayo desde la nube a la tierra. Este tipo de descarga comúnmente ocurre en terrenos planos y sobre edificios y estructuras de poca



altura. Pueden reconocerse por su forma ramificada dirigida hacia la tierra. Dentro de este tipo, la más común es la descarga negativa. Las descargas ascendentes generalmente ocurren en objetos expuestos de gran altura (por ejemplo: torres de telecomunicaciones o en la cima de montañas). Pueden reconocerse por su forma ramificada dirigida hacia la nube. Pueden ser tanto de polaridad positiva como negativa.

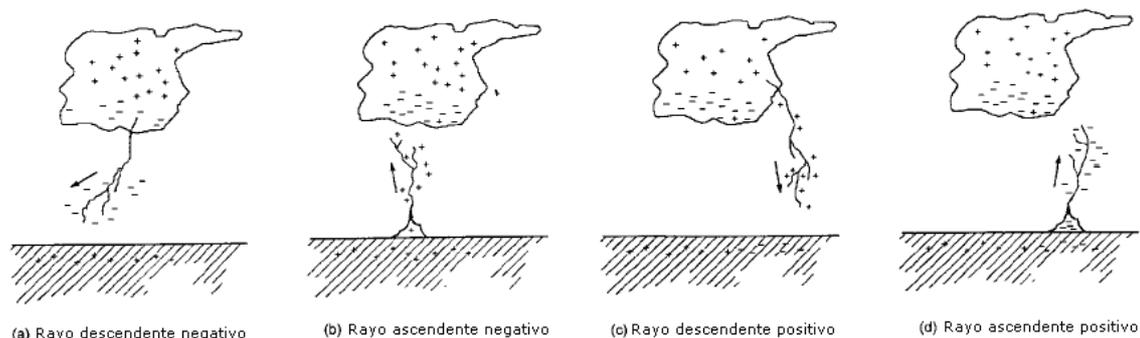


Fig. 5 Los cuatro tipos de descarga entre nube y tierra

El rayo o proceso de neutralización de cargas puede dividirse en tres componentes temporales, que son:

- a) Primera descarga rápida ("first return stroke"): Ocurre cuando se unen los líderes descendentes y ascendentes, transportando gran cantidad de carga en el canal en un tiempo muy pequeño (corriente transitoria de alta intensidad de cresta y de corta duración) que da lugar a fenómenos electrodinámicos y de acoplamiento en las instalaciones eléctricas. Después de esta se producen los líderes dardos ("dart leader") que llevan menor carga que los líderes de paso y originan a las descargas rápidas subsiguientes. Deben su nombre a que se presentan como secciones luminosas del canal con longitudes de algunas decenas de metros que se propagan hacia la tierra, generalmente sin ramificaciones.
- b) Descargas rápidas subsiguientes ("subsequent return strokes"): Descargas de retorno de intensidad más baja que la primera, pero con frentes abruptos que dan lugar a los efectos electromagnéticos mayores. Ocurren unas 4 como promedio. Para el ojo humano todo sucede tan rápido que lo que se observa es un parpadeo.
- c) Descarga de larga duración ("continuing current"): Corriente continua con intensidades de 200 - 400 A durante un tiempo del orden 0,5-1 s, que sigue a la primera descarga de rápida y da lugar a los efectos térmicos más importantes del rayo.

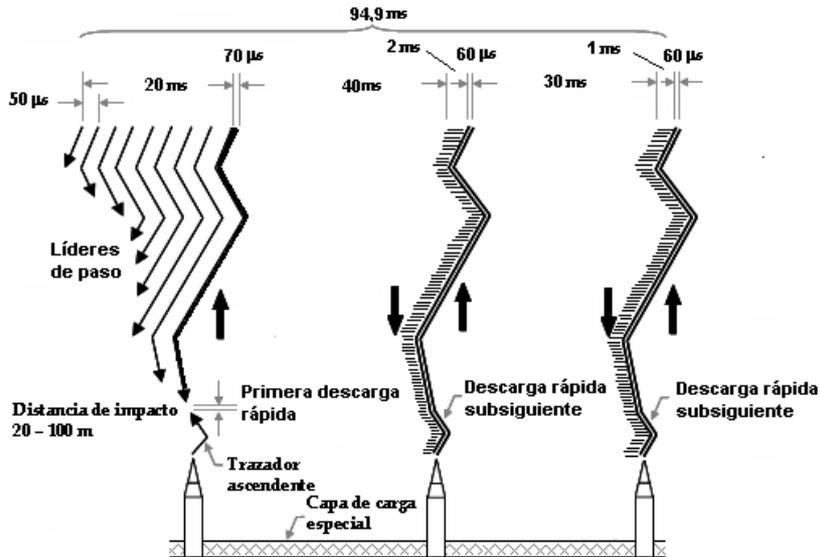


Fig. 6 Representación temporal de una descarga de rayo

A continuación se muestran las posibles componentes temporales de las descargas descendentes y ascendentes.

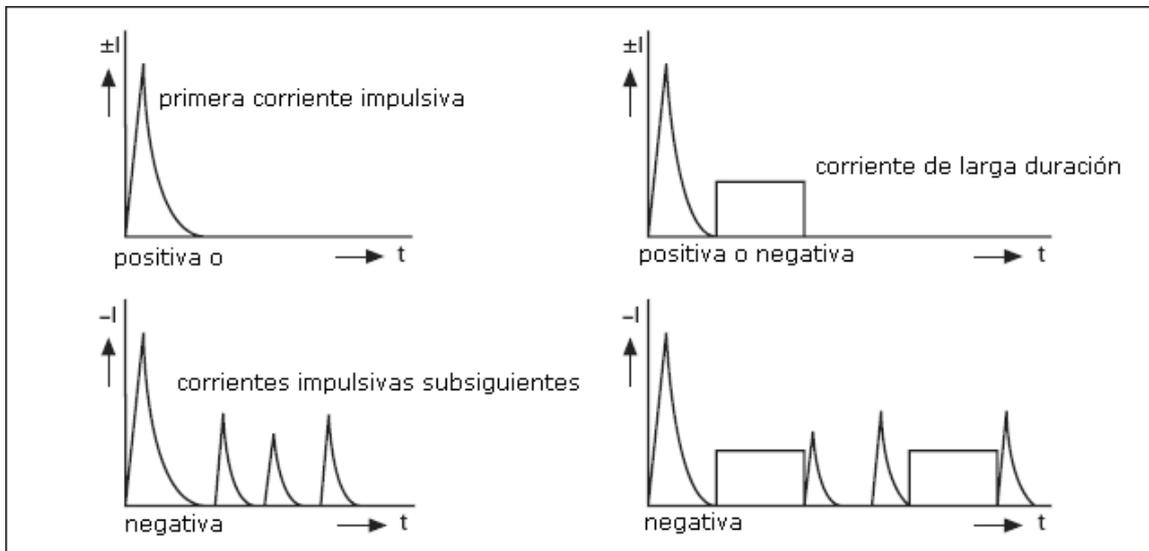


Fig. 7 Posibles componentes de las descargas descendentes

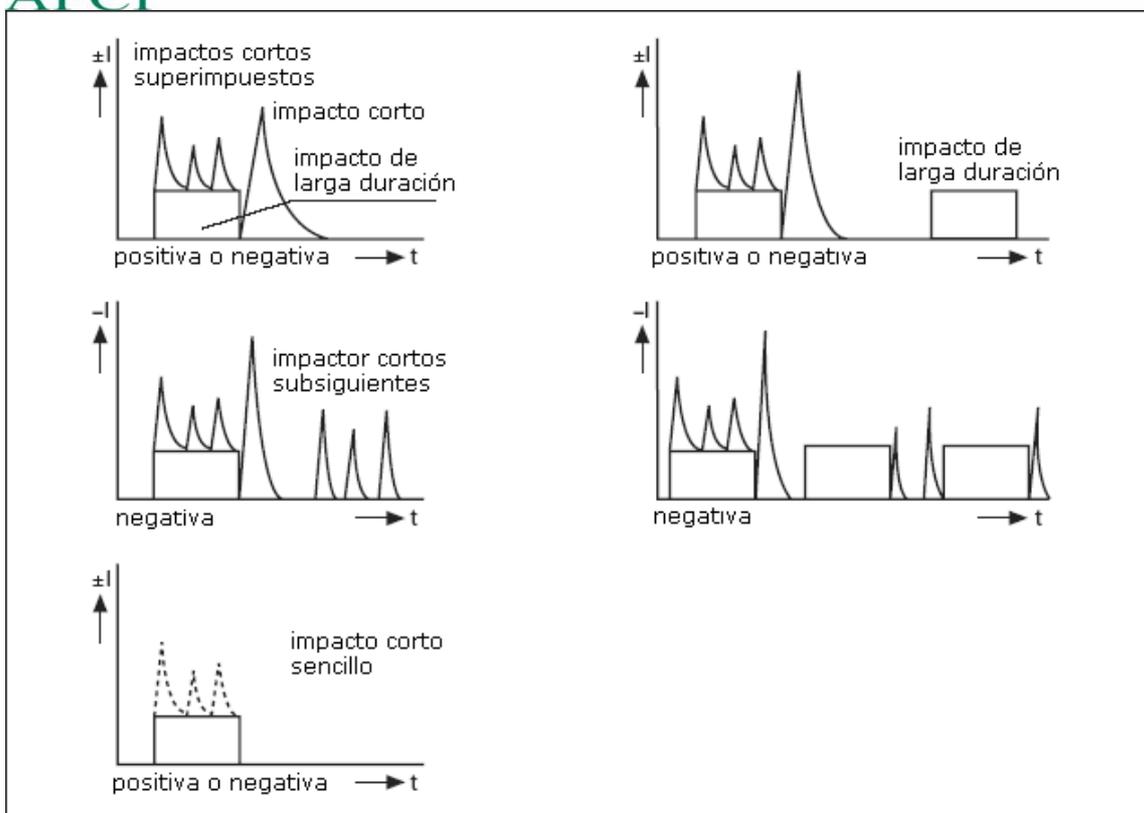


Fig. 8 Posibles componentes de las descargas ascendentes

Parámetro del rayo	Probabilidad de que el parámetro tenga un valor mayor que el indicado							unidades
	99	90	75	50	25	10	1	
Cantidad de descargas componentes	1	1	2	3	5	7	12	
Intervalo de tiempo entre descargas	10	25	35	55	90	150	400	ms
Corriente de la primera descarga	5	12	20	30	50	80	130	kA
Corriente pico de las descargas subsiguientes	3	6	10	15	20	30	40	kA
Pendiente $(dI/dt)_{max}$ de la primera descarga	6	10	15	25	30	40	70	GA/s
Pendiente $(dI/dt)_{max}$ de las descargas subsiguientes	6	15	25	45	80	100	200	GA/s
Carga total entregada	1	3	6	15	40	70	200	C
Carga de corriente continua	6	10	20	30	40	70	100	C
Corriente continua	30	50	80	100	150	200	400	A
Duración total de la descarga	50	100	250	400	600	900	1500	ms

Tabla 1 Distribución de los parámetros principales de las descarga de nube a tierra

La tabla muestra la distribución estadística los parámetros del rayo. El parámetro de Corriente de la primera descarga se utiliza para la determinación de los niveles de protección contra rayo. Los niveles de protección relacionados con la corriente pico de la descarga,  $I$ , y la correspondiente carga del líder,  $Q$ , se derivan de la siguiente ecuación:

$$I = 10.6 Q^{0.7}$$

donde  $I$  está en kA y  $Q$  en C. Una descarga con una corriente pico de 5 KA corresponde a una carga del líder de aproximadamente 0,5 C.

#### Física de la captura

Para lograr la captura de una descarga de rayo que se aproxima, tiene que haber alguna forma de atracción entre el captador y el líder de la descarga. Repasando la física del proceso de descarga y el mecanismo de la terminación, es obvio que hay dos fuerzas atractivas que influirán en la trayectoria del líder del rayo. Éstas son:

1. La fuerza de atracción de cargas distintas, definida por la Ley de Coulomb.
2. La diferencia de potencial creada por el campo electrostático que precede al líder del rayo cuando se aproxima a la tierra.

Ley de Coulomb. Esta ley fundamental de la electrostática plantea que la fuerza de interacción entre cuerpos cargados es directamente proporcional al producto de las cargas eléctricas dichos de cuerpos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos.

Si la distancia entre los cuerpos es mucho mayor que sus dimensiones, ni su forma ni su tamaño intervienen de forma notoria en la fuerza de interacción, pero sí depende de las propiedades del medio que hay entre ellos. Los resultados experimentales demuestran que el aire es un medio que influye muy poco en estas interacciones, por lo puede considerarse que los cuerpos cargados interactúan como si estuvieran en el vacío.

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi\epsilon_0 d^2}$$

donde:  $Q_1$  es la carga del líder, [C]

$Q_2$  es la carga del captador, [C]

$d$  es la distancia entre los dos centros de carga, [m]

$\epsilon_0$  es la constante dieléctrica del vacío:

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}, \left[ \frac{C^2}{N \cdot m^2} \right]$$

$$4\pi\varepsilon_0 = \frac{1}{9 \cdot 10^9}, \left[ \frac{F}{m} \right]$$

Por tanto,

$$F = 9 \cdot 10^9 \frac{Q_1 \cdot Q_2}{d^2}$$

Se sabe que “las cargas distintas se atraen.” El líder que se aproxima usualmente es negativo y tanto la tierra bajo este como todos objetos que descansan en ella se cargan positivamente.

De acuerdo con Uman, la magnitud promedio de la carga contenida en un trazador que se eleva desde el terreno o un objeto en este es de aproximadamente  $10^{-4}$  C. Esta carga es independiente de la fuente que emite el trazador ascendente, por tanto es representativa de la producida por cualquier tipo captador.

La carga contenida en un líder de rayo que se aproxima puede llegar hasta 5 C. Sin embargo, como la carga efectiva en esa región del líder influirá en la carga del terreno u objetos conectados a tierra, puede asumirse aproximadamente como 1 C. El valor absoluto no es importante cuando se hace un análisis comparativo de los captadores potenciales en una situación competitiva ya que en la zona de impacto potencial todos son influidos por la misma carga.

#### Campos electrostáticos

Después de varias décadas de trabajo en pruebas de laboratorio y de campo, se logró desarrollar la ecuación de la zona de captura teórica de un captador convencional simple basada en la distancia de impacto  $d_s$  que mejor se ajusta al método electrogeométrico. Esta es:

$$d_s = 2 \cdot I + 30 \left( 1 - e^{-\frac{I}{6,8}} \right)$$

Una forma más sencilla de esta ecuación es:

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

donde: I = corriente pico del rayo (kA), en el impacto de retorno resultante.



## APCI

### Intercepción de impacto de rayo por un captador

La función del captador de un sistema de protección contra rayo es asegurar una alta probabilidad de que se origine el líder exitoso para interceptar la descarga de rayo que, de lo contrario, pudiera impactar en una parte vulnerable del objeto a proteger y afectarlo de manera adversa debido a la circulación de su corriente. Generalmente, se acepta que intervalo en el cual un captador puede interceptar una descarga de rayo no es constante, sino que se incrementa con la severidad de la descarga.

La eficiencia de intercepción de un captador sólo podría mejorarse si se ideara un dispositivo capaz de incrementar la distancia de impacto ante cada descarga de rayo. Para lograr esto, la tecnología que se emplee tendría que contribuir al incremento de la longitud del líder ascendente que se emite desde la punta del captador.

La longitud máxima de dicho líder ascendente depende únicamente del campo eléctrico creado por el líder descendente que lo forma y la magnitud, formación y características de este campo “inducido” están fuera de nuestro control.

### **REFERENCIAS:**

- “Lightning”. M. A. Uman, Dover Publicatios, New York.
- “A review of the lightning attachment process and requirements to achieve improved modelling”, J.R. Gumley and G. Berger.
- “Interception of a lightning stroke”, C. Menemenlis, University of Patras, Greece.
- “A modern perspective on direct strike lightning protection”, F. D’Alessandro.