

Angel Rodriguez Montes
 Cofundador de la Asociación de Meteorología y Ciencias de la Atmósfera de Andorra “AMACA”
 Director I+D en INT, AR.S.L. <http://www.int-sl.ad/i+d.php>

Los rayos y sus efectos

Los pararrayos convencionales no pueden controlar el tipo de rayo ni garantizar que intensidad de descarga aparecerá en el pararrayos sin crear efectos indirectos.

El rayo es la reacción eléctrica causada por la saturación de cargas electroestáticas que han sido generadas y acumuladas progresivamente en la nube durante la activación del fenómeno eléctrico de una tormenta. Durante unas fracciones de segundos, la energía electroestática acumulada en la nube se convierte en una descarga de energía electromagnética (el relámpago visible y la interferencia de ruido), energía acústica (trueno) y, finalmente, calor.

El fenómeno rayo se representa aleatoriamente entre nube-nube, nube-tierra o tierra-nube a partir de un potencial eléctrico (10/45 kV), entre dos puntos o zonas de influencias de diferente polaridad e igual potencial, para compensar las cargas.

La densidad de carga del rayo es proporcional al tiempo de exposición de la saturación de carga electroestática de la zona expuesta por la nube (**sombra eléctrica**). A mayor densidad de carga de la nube, mayor inducción electroestática en tierra, y mayor probabilidad de generar un líder en las estructuras. **La diferencia de potencial** entre la nube y la tierra facilita una transferencia de cargas en las zonas afectadas en tierra, y en función de la resistencia del aire o materiales expuestos, se representa en tierra en una **sombra cargada eléctricamente**.

La sombra eléctrica viaja según la trayectoria de la nube, es la zona donde los impactos de rayo se pueden representar. Su frente de actuación se sitúa normalmente, por delante de la nube y en sus frentes laterales, donde predomina un fuerte intercambio de partículas cargadas desde la base de la nube al suelo y viceversa, causado por las corrientes de convección. Dentro de la influencia de la sombra eléctrica y por donde ésta viaja, se genera el efecto punta.



El efecto punta puede ser estático en un punto, en movimiento en el mismo punto o viajar por el suelo y estructuras en función de la dirección y velocidad de la nube, el efecto del movimiento, causa la sensación de ver una corona o múltiples efectos puntas llamado entonces “**efecto corona**”, son diminutas chispas eléctricas que aparecen en la parte superior de los materiales, generalmente es de color verde-azul y con fuerte olor a ozono (ionización del aire), el efecto punta aparece siempre dentro de la sombra eléctrica.

Los marineros llaman también al efecto punta, fuego de Sant Elmo, el motivo es que el efecto punta se representaba durante la tormenta en lo más alto del mástil de madera, el movimiento constante de la nave a causa del temporal generaba un movimiento aleatorio del mástil referente al aire dentro de un campo eléctrico natural de alta tensión.

Este efecto de movimiento lateral y el desplazamiento del mástil, transformaba visualmente las chispas del efecto punta en un efecto óptico de fuego formando una corona. Cuando se visualiza este fenómeno (el campo eléctrico-Atmosférico de alta tensión supera los 1500 voltios), se puede apreciar y sentir peligrosamente en nuestro cuerpo el campo de alta tensión. El efecto que produce en nuestro cuerpo es un cosquilleo, que nos puede poner, literalmente, los pelos de punta.

El efecto punta puede aparecer pero no transformarse en una descarga de rayo, este fenómeno avisa de la presencia de un campo eléctrico de alta tensión y si persiste en tiempo e intensidad, creará entonces un Líder o trazador.

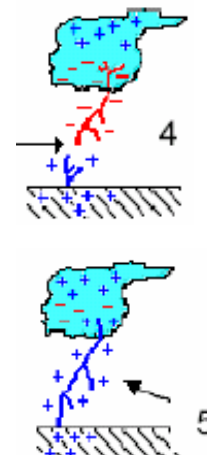
El líder es la formación de una guía escalonada descendente (Step Leader) que guiará la descarga del rayo desde la nube cerca de la zona en tierra, donde por inducción del campo eléctrico de alta tensión, se creará otro líder ascendente desde tierra para buscar la interconexión de ambos y crear un trazado por donde se compensaran las cargas.

El rayo tiende a seguir el camino preparado previamente, **donde la concentración de transferencia de electrones** superará los 10.000 Culombios por segundos en un punto concreto, para compensar las cargas electroestáticas de signos opuestos.

Cómo se desarrolla el líder o guía escalonada: A partir del campo de alta tensión presente, un electrón ioniza un átomo produciendo un segundo electrón y éste a su vez junto con el electrón original puede ionizar otros átomos produciendo así una avalancha que aumenta exponencialmente en función de la carga (guía escalonada, figura 4)

Las colisiones no resultantes en un nuevo electrón provocan una excitación que deriva en el fenómeno luminoso. A partir de ese momento, el aire cambia de características gaseosas al límite de su ruptura dieléctrica (Trazador o canal ionizado, figura 5).

El fenómeno del líder, no es constante ni estable, puede viajar y moverse en función del desplazamiento de la sombra eléctrica, afectando a todo aquello que se encuentre a su paso. Nosotros nos podemos cruzar temporalmente en nuestro desplazamiento con este fenómeno, sea a pie, en coche o en barco.



La intensidad de la descarga del rayo es variable y dependerá del momento crítico de la ruptura dieléctrica del aire (resistencia variable) entre los dos puntos de transferencia de la carga así como la facilidad de transporte de la energía del medio (conductancia variable) y de la capacidad de absorción o disipación de la zona de impacto en tierra (resistencia Variable).

Como media, se utiliza erróneamente el valor de 30.000 Amperios de intensidad del rayo, pero podemos afirmar que los valores actuales de media son más altos llegando a superar los 50.000 Amperios y rayos superiores a 200.000 Amperios.

El aire no es un aislante perfecto su resistencia dieléctrica antes de la ruptura es de 3kV /mm y varía proporcionalmente con la altura.

La ruptura dieléctrica del aire, también variará según el grado de contaminación atmosférica, temperatura, humedad, presión y radiación electromagnética natural o NO.

La tensión eléctrica, aparece durante el proceso de la descarga del rayo y su valor es proporcional a la resistencia de los conductores que transportan la corriente de la descarga del rayo, es decir: en función de la resistencia de los conductores eléctricos, estos se encargaran de llevar la corriente a tierra en más o menos tiempo, la corriente tendrá un freno o una aceleración a su paso a tierra (resistencia) y por ello aparecerá una tensión (Voltios) temporal como por ejemplo: La tierra, roca, madera, hierro, árbol, barco, depósito de gas, instalaciones de pararrayos, las puestas a tierra, las personas etc.

Para conocer el valor de la tensión que se puede generar en una instalación, basta con aplicar la ley de Ohm a un impacto de rayo. Por ejemplo, supongamos que el impacto de rayo se genera en el pararrayos y el INM nos proporciona su identidad, es decir, un rayo con un valor de intensidad de descarga de 200.000 amperios tomaremos este valor como valor (I), y como referencia de la resistencia tomaremos la toma de tierra del pararrayos es decir 5 ohmios (R), la tensión que apareció en el cable de tierra del pararrayos fue de: $E = I \times R$ (1.000.000 de voltios).

El rayo puede transportar una carga de electrones en menos de un segundo equivalente a 100 millones de bombillas ordinarias, la media que se valora por rayo es de 20GW de potencia.

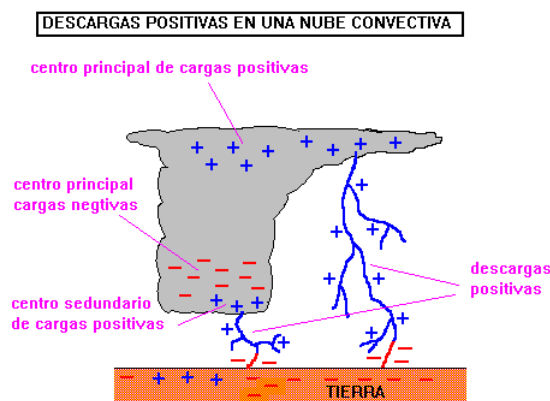


FIGURA3. [Modelos Conceptuales: Rayos \(MCM2\)](#)
Autores : Olinda Carretro Porris, Francisco Martín León.

El sentido de la descarga del rayo es, generalmente, un 80% de la nube a la tierra (rayos negativos), el 10 % son descargas ascendentes de tierra a nube (rayos positivos) y el resto entre nube y nube o dentro de la misma nube. Las descargas de los rayos positivos suelen ser de más intensidad y más destructivos que los negativos (2, Ver referencias).

No se puede garantizar la zona de impacto del rayo una vez formado.

La trayectoria del rayo puede ser caótica, siempre predominarán los ambientes eléctricos cargados, aunque los estudios del campo eléctrico atmosférico en tierra determinan que la distribución de cargas en tierra no es estática, sino dinámica, al formarse y generar aleatoriamente chispas en diferentes puntos geográficos dentro de la trayectoria de la sombra eléctrica, la intensidad y situación del campo eléctrico cambia radicalmente pudiendo generar impactos de rayos laterales, con trayectorias laterales de más de 17 Km. entre los dos puntos de contacto.



Figura 4, www.meteored.com , Autor : JUANHITO

Una vez formado el rayo, su impacto no depende de la resistencia eléctrica del terreno .

Los estudios de la densidad de impactos de rayos según la tipología de terreno (figura 4.1), nos determina que el rayo puede incidir en cualquier lugar del suelo independientemente de su resistencia dieléctrica. La zona de estudio de este gráfico supera los 32 km² y a 2000 metros sobre el nivel de mar en plena montaña, el periodo de estudio fue de 5 años, entre 1999 y 2004 incluidos.

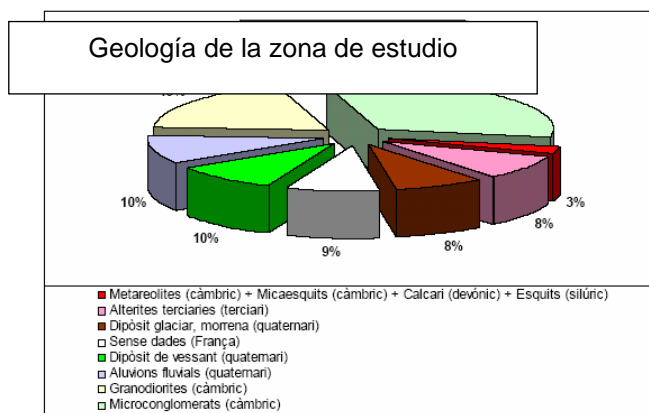


Figura 4.1 Ambiotec Estudio de densidad de rayos según geología, Andorra.

De los 473 rayos analizados, 21 impactos fueron positivos (Tierra-nube) y 452 impactos negativos (nube-tierra) es decir, un 5 % de las descargas fueron positivas.

El estudio, determina que las zonas de impactos de rayos son aleatorias, aparecen registros de impacto en las piedras, en tierra seca o húmeda, en las cumbres de las montañas, en las laderas y valles, en el suelo cerca de una torre de alta tensión. Las descargas de rayo de este estudio varían de intensidad, entre 9.000 a 171.000 Amperios y la intensidad de descarga del rayo no esta relacionada con la resistencia eléctrica del terreno en el punto de impacto ni su altura.

En la zona de estudio, podemos encontrar terrenos de diferente compuesto mineral, la resistencia dieléctrica del terreno en un mismo punto, varía enormemente según la estación del año, pasando de valores de 10 Ohmios a valores de 100 Ohmios en invierno a causa del hielo y en pleno verano a causa de la evaporación del agua.

Ejemplo de diferentes valores de la resistencia de tierra en función del terreno:

Valores medios en Ω

Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos 50
 Terrenos cultivables poco fértiles, terraplenes compactos y secos 500
 Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables 3.000

Valores de referencia en Ω de diferentes terrenos

Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda.	5 a 100
Arcilla plástica 50	
Margas y arcilla compacta	100 a 200
Margas del jurasico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena cilicea	200 a 300
Caliza compacta	1.000 a 5.000
Suelo pedregoso desnudo	1.500 a 3.000
Pizarra	50 a 300
Granito, gres y alterados	100 a 600

Repercusiones eléctricas

Durante la descarga del rayo se generan inducciones y acoplamientos en las líneas de transporte eléctrico y de tele-comunicaciones. Como referencia, en cada impacto de rayo en un pararrayos tipo FRANKLIN, antes, durante y después de su descarga a tierra, se generan otros fenómenos eléctricos indirectos que repercuten destruyendo nuestras instalaciones y a las instalaciones de nuestros vecinos en un radio de acción proporcional a la intensidad de la descarga, que puede alcanzar los 1.500 metros. El rayo, aparece repetidamente, durante las tormentas de cada año.

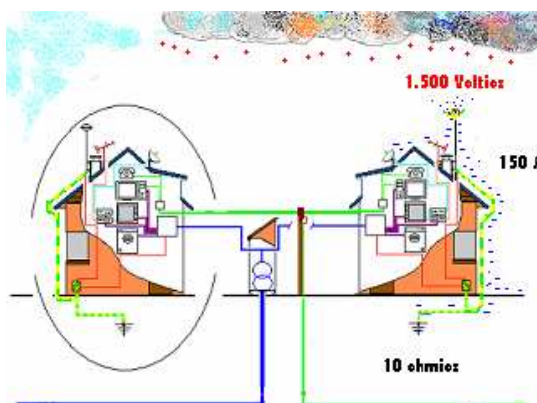
Los efectos del impacto de rayo durante su descarga pueden ser directos o indirectos a causa de:

1. Cargas electrostáticas durante la formación del líder.

En el momento de la presencia de la sombra eléctrica en tierra, el campo eléctrico presente es de alta tensión, y genera el efecto punta en la parte más alta de la instalación. Este efecto se transforma visualmente en chispas que salen de los materiales expuestos a la sombra eléctrica. En el caso de una punta de pararrayos, las cargas electrostáticas generan interferencias y ruidos que se pueden acoplar en las líneas de datos o señales de TV y radio. Durante la aparición de este fenómeno, por el cable de tierra del pararrayos circularan corrientes superiores a los 150 Amperios, **¿ por qué ?**.

Pues porque las chispas del efecto punta, aparecen a partir de la ionización del aire, y para ionizar el aire, necesitamos como mínimo 1.500 voltios en la punta de un electrodo (dependiendo de la calidad del aire), si aplicamos la Ley de Ohm y tomamos los 1.500 Voltios como referencia de tensión (E) y los 10 Ohmios de la resistencia de la toma de tierra como referencia de resistencia (R), tendremos una intensidad de corriente (I) que circulará por el cable de tierra de :

$$I = E / R \quad (150 \text{ Amperios}).$$



2. Pulsos electrostáticos (ESP).

Los pulsos electrostáticos son transitorios atmosféricos y aparecen en los equipos por la variación brusca del campo electrostático presente en la zona durante la tormenta, la causa de este fenómeno la genera la diferencia de potencial entre la nube y la tierra. Sus efectos se transforman en pulsos eléctricos que aparecen a partir de impactos de rayos cercanos. Todo aquello que se encuentre suspendido en el aire referente a tierra dentro de la sombra eléctrica, se cargará con una tensión proporcional a su altura y el campo electrostático presente, como si de un condensador se tratara.

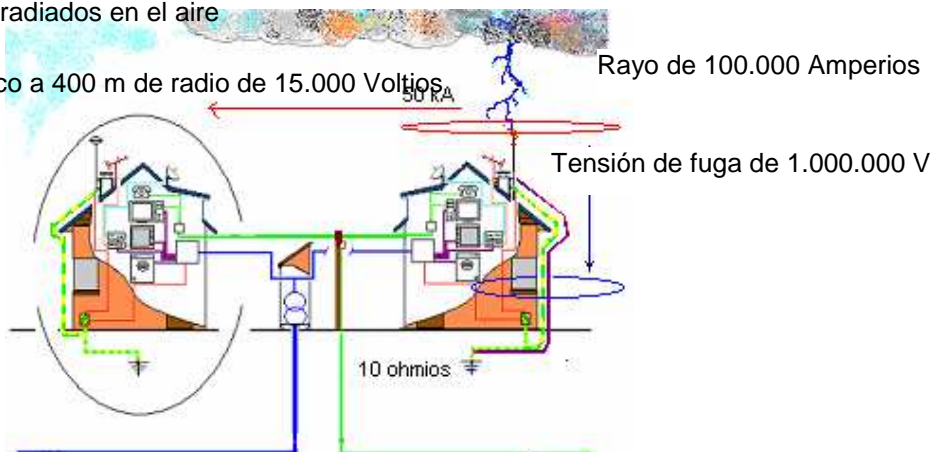
Como referencia a 10 metros de altura, en las líneas de datos o telecomunicaciones aisladas de tierra, pueden padecer tensiones de 100 a 300.000 voltios con respecto a tierra dentro de un campo electrostático medio.

3. Pulsos electromagnéticos (EMP) .

En el instante mismo del impacto de rayo en un pararrayos o en un elemento cualquiera, el contacto físico de la energía del rayo en el punto de contacto, genera una chispa que se transforma en un pulso electromagnético que viaja por el aire, en el mismo instante el flujo de la corriente que circula por los conductores eléctricos de tierra a la toma de tierra, genera un campo magnético proporcional a la intensidad de la corriente de descarga del rayo.

100.000.000 Kilowatios radiados en el aire

Pulso electromagnético a 400 m de radio de 15.000 Voltios



La energía radiada por el pulso electromagnético en el aire, viaja a la velocidad de la luz induciendo por acoplamiento todo aquello que se encuentre a su paso referente a tierra, destruyendo nuestros componentes electrónicos y los de nuestro vecino en un radio de 1.500 metros y llegando la señal radiada a más de 300 km de distancia.

La intensidad del pulso electromagnético es variable en función de la intensidad de descarga del rayo y del punto de contacto físico con el elemento impactado, el tiempo de la transferencia de la corriente a tierra y el nivel de absorción de la tierra física, determinaran los valores eléctricos de acoplamiento en los equipos cercanos.

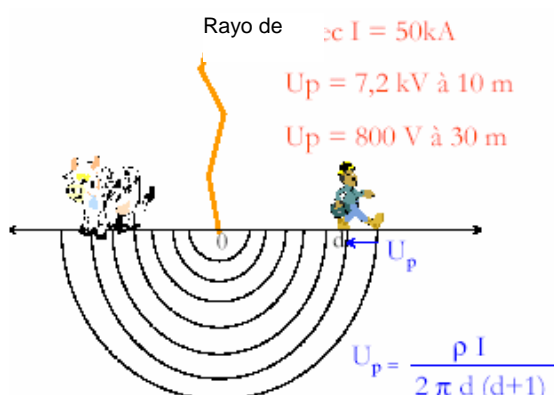
4. Sobretensión y tensiones de paso durante el impacto de rayo

El impacto de rayos directos sobre los cables aéreos, genera una onda de corriente, de amplitud fuerte, que se propaga sobre la red creando una sobre tensión de alta energía.

Las consecuencias: Destrucción de material, envejecimiento prematuro de los componentes electrónicos sensibles, disfunción de los equipos conectados a la red con peligro de incendio.

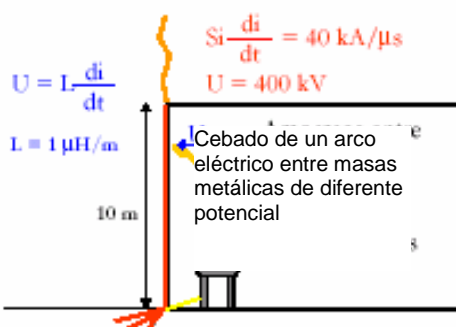
Por ejemplo, si aplicamos la Ley de Ohm, y tomando un valor medio del impacto de un rayo a tierra de 50.000 Amperios (I) y un valor de la resistencia de la toma de tierra de 10 Ω (R), entonces se obtiene unos resultados de tensión que circulará por los cables de tierra en el momento del impacto de 500.000 Voltios (Alta Tensión). $E = I \times R$

La tensiones de paso generadas en ese momento por la diferencia de potencial entre electrodos o partes metálicas, dará un resultado de 7.200 Voltios a 10 metros de distancia y a 30 metros quedará un residual de 800 Voltios.



[Protección contra el rayo en instalaciones industriales, Pierre Gruet, INERIS](#)

Los equipos que no estén conectados a la misma toma de tierra, tendrán el riesgo de que les aparezcan arcos eléctricos que saltaran entre masas de diferente potencial durante el instante de la descarga del rayo cercano.



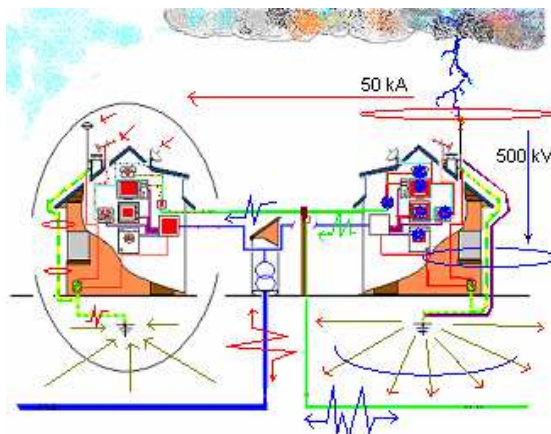
[Protección contra el rayo en instalaciones industriales, Pierre Gruet, INERIS](#)

5. Corrientes de tierra.

En función de la intensidad de descarga del rayo las tomas de tierra no llegan a adsorber la totalidad de la energía potencial descargada en menos de 1 segundo, generando retornos eléctricos por la toma de tierra al interior de la instalación eléctrica. Este fenómeno puede generar tensiones de paso peligrosas.

Otro fenómeno que repercute a tensiones de tierra, es la diferencia de potencial entre masas o electrodos de tierra cercanos al impacto de rayo, al producirse la descarga del rayo todos los fenómenos antes descritos interactúan entre ellos y tienden a descargar a tierra, en función de la distancia entre electrodos se generará una resistencia propia del semiconductor (el compuesto químico de la tierra física), y aparecerán tensiones de paso peligrosas entre electrodos.

Otro fenómeno importante que repercute directamente a la vida útil de los electrodos, es su pérdida de iones en cada proceso de transferencia. Es decir cada impacto de rayo en un pararrayos, genera una fuga brutal de corriente que pasa a tierra por medio del electrodo de tierra a la tierra física, en ese momento se crea un intercambio de iones o electrolisis natural entre el material del electrodo y la tierra física, el intercambio iónico brutal e instantáneo reacciona con el entorno, creando una cristalización de la tierra física.



Cada descarga de rayo, evapora el agua que contiene la tierra a su alrededor, modificando la resistencia propia de la toma de tierra.

Con el tiempo los electrodos que se utilizan como puesta a tierra, llegan a desaparecer, ya en su primer año de vida, pierden contacto físico con la tierra y su capacidad de transferencia disminuye peligrosamente a causa de la oxidación.

Se tiene que tener en consideración que todos los materiales o puntos de contacto a tierra tiene diferente valores de comportamiento eléctrico, su propia resistencia como conductor eléctrico puede variar considerablemente en función de las condiciones que lo rodean (humedad, temperatura, contaminación química, etc.).

Mantenimiento y revisión anual de las tomas de tierra eléctricas es obligatorio para garantizar una buena disipación de las fugas de corriente.

Algunos valores relacionados con el fenómeno rayo:

1. Tensión entre nube y un objeto a tierra.....1. a 1.000. kV.
2. Intensidades de descarga5 a 300 KA
3. di/dt7.5kA/s a 500kA/s
4. Frecuencia..... K Hz a 1 M Hz.
5. Tiempo.....10 Microsegundos a 100. Milisegundos.
6. Temperatura superior a.....27.000 grados Centígrados.
7. Propagación340 metros por segundo.
8. Campo electrostático por metro de elevación sobre la superficie de la tierra.....10 kV.

Angel Rodríguez Montes