

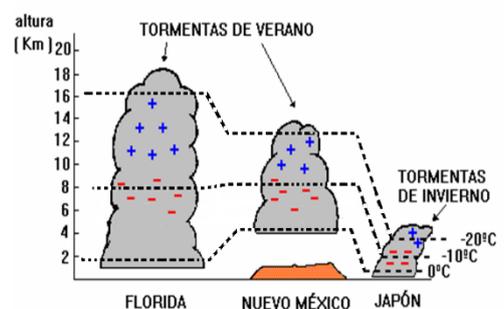
## EVOLUCIÓN DE LA DINÁMICA DEL RAYO NEGATIVO.

A continuación exponemos nuestra teoría de la evolución del campo eléctrico atmosférico en tierra, considerando que la fuente de energía está causada por la termodinámica de una célula de tormenta llamada Cumulonimbos (nube) y con una tensión progresiva de carga y, una constante variable de transferir su energía en forma de descargas (RAYOS), pudiendo crear tensiones superiores a los 50.000 voltios a nivel de suelo y descargas de rayos detectados de 450.000 Amperios.

Para entender los efectos colaterales del rayo, separamos el proceso de su desarrollo en 4 fases llamadas "INSTANTES", pasando por la excitación del rayo a nivel eléctrico desde el plano de tierra, hasta llegar a la descarga.

Tenemos que recordar, que la constante del patrón "tiempo", es una variable impredecible y también depende de otros muchos parámetros como la contaminación atmosférica, la temperatura del medio, el grado de humedad, los vientos predominantes, la altura de las nubes, la separación entre ellas, su desarrollo vertical, la radiación solar, el valor de la resistencia eléctrica de los elementos afectados y el valor eléctrico de la resistencia del terreno en ese instante, entre otras cientos de variables. Con ello queremos decir que cada instante tendrá unos valores de referencia que en otras situaciones geográficas pueden variar. Parametrizar el fenómeno eléctrico del rayo para controlarlo, es un paradigma, ya que solo podemos trabajar con los resultados de sus efectos basados en la experiencia de años de estudios, pero inalcanzable económicamente.

Mientras, podemos investigar su comportamiento, seguirlo y prevenir su presencia con sistemas de teledetección, o crear barreras de captación para cubrir cualquier trayectoria de rayo fuera de la zona reduciendo así el riesgo en el aérea de protección. Otra opción sería utilizar condensadores con capacidad de carga suficiente, para rebajar la diferencia de potencial y tensión de la zona de protección con el objetivo de conocer la polaridad y des ionizar la zona y polarizarla al mismo valor que la nube. Mientras no pararemos de investigar soluciones de protección adecuadas en cada caso. En esta simulación no se contemplan los rayos positivos (tierra/nube), ya que tienen un comportamiento completamente distinto al rayo negativo (nube /tierra). Los rayos positivos los analizaremos también más adelante a igual que otros tipos de rayos no conocidos,.

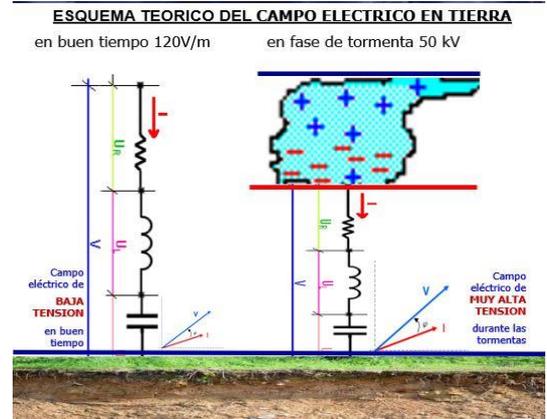


**PRIMER INSTANTE:**

**El LIDER se representa en forma de descargas electrostáticas (chispas).**

En función de la trayectoria de la borrasca, las nubes de tormentas trabajan su carga individualmente, según evoluciona la termodinámica de la nube, su carga interna progresa y genera en el suelo un aumentando de la diferencia de potencial entre la célula y el suelo. Debido al aumento del potencial de carga de la célula (Nube Cumulonimbos), este fenómeno crea una especie de sombra eléctrica progresiva en el suelo y prioritariamente en los puntos más altos.

Según su evolución la carga de la nube, el campo eléctrico natural en tierra pasa de 120 V/m en tiempo estable a valores de alta tensión superior a 15 kV/m.



La ionización del aire empieza a partir de los 1.500 V/m y según aumenta la diferencia de potencial entre la nube y la zona afectada, el aire se electrifica apareciendo en los elementos (descargas electrostáticas), que salen de cualquier elemento sea o no un elemento conductor eléctrico, su intensidad depende de la tensión de ese momento y la tensión de arranque puede empieza a los 1.500 V/m. Si aplicamos la Ley de Ohm para conocer la corriente que aparece por el cable de tierra del pararrayos, o en su caso, la corriente que circulara por los elementos afectados durante el fenómeno veremos que para 1.500 V x 10 ohmios de resistencia de la toma de tierra, aparecen 150 amperios como corriente que circula en sentido a la toma de tierra en función de la polaridad del rayo, valores eléctricos que incluso se pueden medir.



Los marineros a este efecto de ionización del aire, lo llaman "FUEGO DE SAN TELMO" dado que el movimiento del mástil con las olas crea la sensación de un fuego en el mástil.

La constante de ionización en el aire, entre la nube y el elemento ionizado empieza abrir un camino de baja resistencia en el aire, si esta constante de ionización aumenta ( $n^{\circ}1$ ), el elemento se recalienta y abrirá un camino ionizado en el aire en dirección a la nube, mientras aumenta la diferencia de potencial en el suelo, el efecto de chispa pasa a efluvio ( $n^{\circ}2$ ) si la constante se mantiene se transforma en un trazador ( $n^{\circ}3$ ), si la velocidad de desplazamiento de la nube es superior al aumento de la carga de la nube el proceso desaparecerá, si la constante se mantiene, el efecto del trazador se puede llegar a desplazar por el suelo y aparecer en otros elementos, si la carga de la nube es superior a la velocidad de desplazamiento de la nube, la descarga se producirá en el punto de impacto directo marcado por el trazador, cerca de él, o acompañado de ramificaciones de descargas laterales si el ambiente de la zona está muy ionizado o contaminado de gases raros.

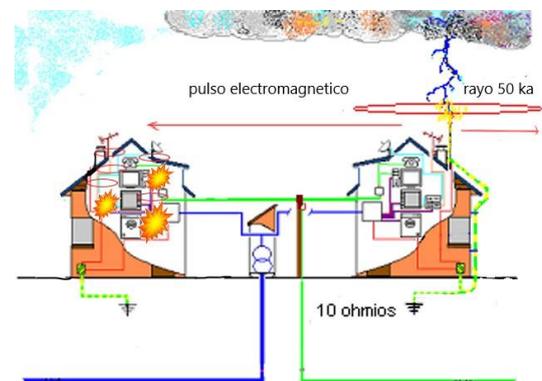
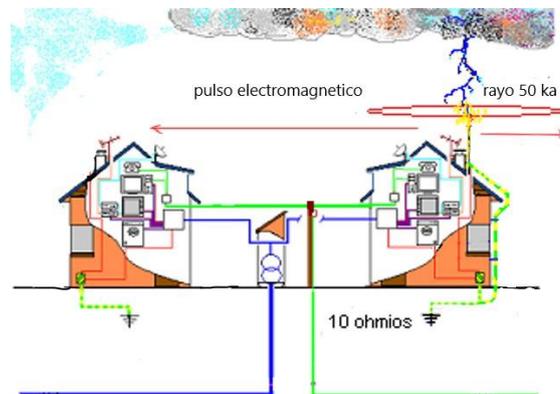
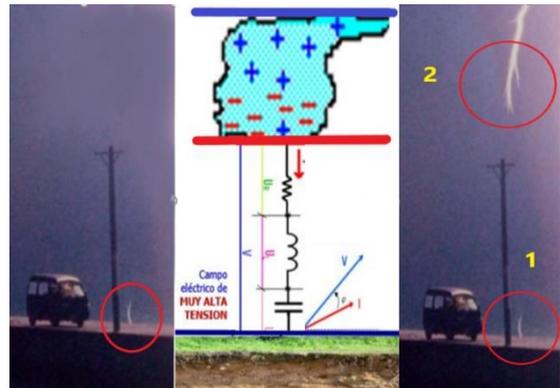
Durante el proceso de ionización del aire y antes del impacto del rayo, aparece el ruido eléctrico que se acopla en los cables de datos y energía más cercanos, que incluso se pueden escuchar por la radio en la banda de frecuencia AM.



## Segundo instante: Descarga del rayo y Pulsos electromagnético (EMP).

Durante el primer instante anterior, vimos como la diferencia de potencial aumenta en el suelo, creando un campo eléctrico con un poder potencial de ionización en forma de líder o de l efluio (1), y que este efecto, es el precursor de un camino de baja resistencia entre el elemento expuesto y la nube , creando un trazador (2) para marcar el camino de la descarga del rayo. En el “**Segundo instante**”, es cuando aparece el impacto de rayo, sea en la punta de un pararrayos o en un elemento cualquiera, su intensidad puede variar entre 5 y 450.000 amperios y esta variable depende de muchos factores, entre ellos la resistencia eléctrica del aire ya que el trazador ha dejado abierto un camino, pero al ser gaseoso ese camino, la recombinación del mismo puede variar su valor de resistencia muy rápidamente. A más alta contaminación del aire y más baja resistencia eléctrica del terreno o de los elementos afectados, aparecerán rayos entre 10 y 50 kA, a menos contaminación del aire y alta resistencia del terreno o elementos afectados, aparecerán rayos entre 50 y 100 kA superando en algunos casos los 200.000 Amp. En el segundo instante del contacto del rayo en el elemento afectado ( un pararrayos por ejemplo), se crea la aparición del **pulso electromagnético** radiado por el aire, que será proporcional a la intensidad de la descarga del rayo y la resistencia eléctrica del elemento tocado y su valor de referencia a tierra. Si tenemos los datos del impacto del rayo y sus coordenadas por una empresa de teledetección de rayos, podemos medir la resistencia de la toma de tierra del pararrayos y aplicar la ley de Ohm para conocer más datos: 50.000 Amp del rayo x 10  $\Omega$  de la resistencia de la toma de tierra , tendremos un chispazo de 500 kV y una potencia de 25 Mega Watios. La onda de energía radiada será perimetral por el aire con un radio de acción fuerte en su epicentro bajando proporcionalmente con la distancia. A su paso destruirá componentes electrónicos en radio de 100 metros aunque no estén referenciados a tierra, pudiendo sobrepasar distancias de 300 km. La radiación emitida en su frente de onda pasara de 100 kA/ $\mu$ s y decreciendo a unos 50 kA/ $\mu$ s en funcion de la distancia, induciendo a su paso por acoplamiento, valores de corriente en los elementos (sobretensiones inducidas).

A 300 km, aún se detecta la señal del rayo en los radares de meteorología y en los sistemas de teledetección de rayos recalculan por triangulación, su polaridad, intensidad y lugar del impacto. La trayectoria del rayo no es caprichosa por si sola, como hemos hablado anteriormente hay un proceso previo que determina el punto de impacto que normalmente es descendente en un 80 % de los casos, con canales únicos o con ramificaciones, si durante este proceso de ionización y trazador se mueven a una constante de velocidad y en ese proceso , la nube baja de altura por cambios de presiones o cambios de temperaturas, el camino ionizado se reducirá de distancia y de resistencia facilitando la aparición del rayo, para impactar en el punto marcado. En



esto momento estamos descubriendo los rayos laterales, capaces de impactar en el lateral de un elementos como es un monolito, en el lateral de una torre, en la planta baja de un edificio o volver a tras en su desplazamiento para descargar en una zona previamente electrificada.

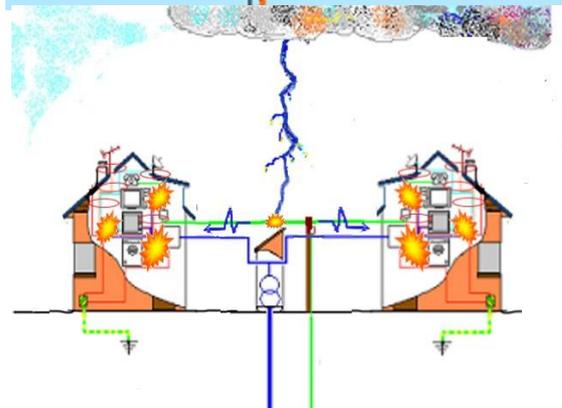
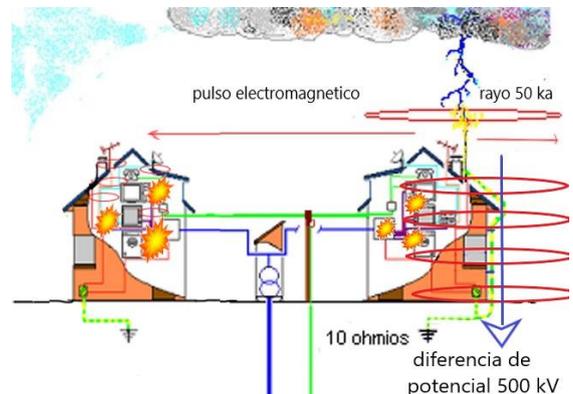
### Tercer instante: Sobretensiones inducidas y conducidas.

Mientras se produce el pulso electromagnético por el aire en el instante 2, al mismo tiempo en el instante 3 la corriente del rayo fluye por los cables de tierra en el caso del pararrayos, o por cualquier medio conductor en otros, siempre en sentido a la toma de tierra. Si consideramos que el rayo es de 50.000 amperios como referencias anteriores y nuestra toma de tierra es de 10 ohmios, la corriente del rayo tendrá un freno en su descarga a tierra por la resistencia de los materiales o la resistencia de la toma de tierra, creando una diferencia de potencial entre el momento del impacto del rayo en la punta y la toma de tierra de 500.000 voltios.

Los elementos afectados por el paso de la corriente, pueden llegar a ponerse al rojo vivo y fundirse por la alta temperatura. cuando se diseña una instalación de pararrayos, no se contemplan los efectos térmicos generados al paso de 50.000 amperios, ya que el coste de los cables serían inviable.

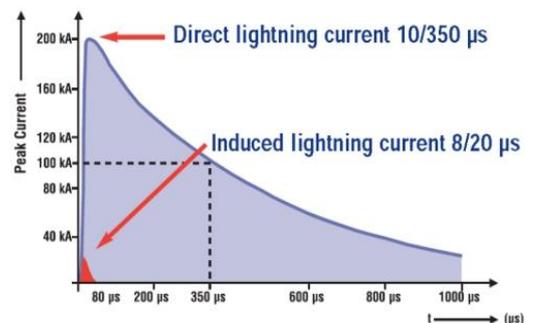
El paso de la corriente por el cable de tierra, genera un campo magnético que viaja desde la punta del pararrayos en sentido la toma de tierra, su valor es proporcional a la intensidad de la corriente de la descarga del rayo, el desplazamiento brusco del campo magnético se acopla a su paso por inducción en los cables y equipos electrónicos, en el caso leve pueden padecer una magnetización de los metales y electrónica sensible, en el caso grave se generara una sobretensión inducida en los componentes eléctricos.

Si el rayo impacta directamente en la línea eléctrica de la compañía, los efectos de sobretensiones conducidas, procederán de la red exterior al interior de las instalaciones creando la averías directas de los equipos eléctricos y de potencia .



### Cuarto instante: Aumento del potencial de tierra, Tensiones de paso y de contacto

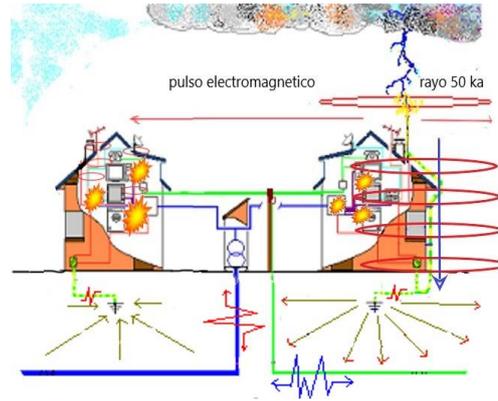
En función de la intensidad de descarga del rayo en el pararrayos o un elemento cualquiera, la toma de tierra y la tierra física, tienen que estar preparadas para disipar la energía del rayo en menos de 40  $\mu$ s. Dependiendo de la composición de minerales de la porción del terreno donde se sitúa la puesta a tierra, su humedad, el estado de sulfatación y oxidación de los materiales la forman, la toma de tierra no podrá disipar en el tiempo necesario los 50.000 amperios que están bajando por el cable de tierra desde el pararrayos.



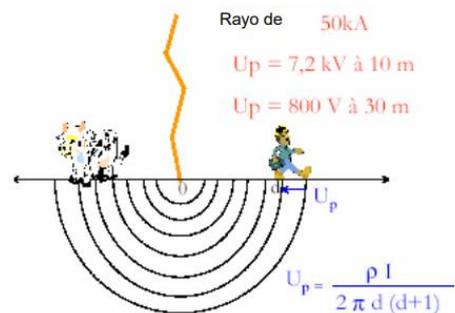
Con un rayo de 50.000 amperios y una toma de tierra de 10 ohmios, la tensión que aparecerá por diferencia de potencial será de 500.000 voltios.

Si en ese momento la toma de tierra tiene un valor 30 ohmios por falta de mantenimiento o por estar seco el terreno, los valores de tensiones pasaran a ser de 1.500.000 voltios si aplicas la ley de ohm para el mismo rayo.

Durante el instante cuatro, la suma de la resistencia de la toma de tierra y el conjunto del pararrayos, conexiones y cable de tierra, crearan un freno a la corriente entre el punto de impacto del rayo y la tierra física o porción de terreno, creando varios efectos eléctricos colaterales a causa de la diferencia de potencial.

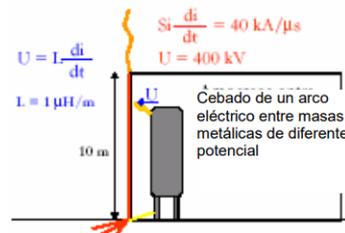


**Tensiones de paso:** las personas que transiten cerca del radio de acción de la toma de tierra del pararrayos en el momento del impacto del rayo, se encontraran expuestos a un alto riesgo de electrocución por tensiones de paso o arcos eléctricos, en función de la intensidad del rayo y la distancia.



**Tensiones de contacto:** Las tensiones de contacto aparecerán en un radio perimetral a partir de la situación de la toma de tierra en tuberías, puertas, ventanas, escaleras, barandillas de accesos y cualquier metal referenciado a tierra.

**Chispas eléctricas:** Aparearán en metales no referenciados a tierra, en un radio perimetral a partir de la situación de la toma de tierra en tuberías, puertas, ventanas, escaleras, barandillas de accesos.



**Sobretensiones:** se originaran por los cables de tierra y neutro en sentido los equipos eléctricos y electrónicos cercanos.

**FICHA TÉCNICA DEL RAYO.**

Protección contra el rayo en instalaciones industriales, Pierre Gruet, INERIS

**Valores orientativos del rayo.**

Tensión que pueden aparecer en tierra antes de la descarga del rayo.....	1.000 a 45.000 V
Campo electrostático por metro de elevación sobre la superficie de la tierra.....	10 kV
Intensidades de corriente que pueden circular por los cables de tierra.....	5.000 a 350.000 A
Tensiones que pueden aparecer en los cables de tierra y la tierra.....	50.000 a 3.500.000 V
• di/dt en función del tipo de rayo.....	7.500 A/s a 500.000 A/s
Potencia disipada de un rayo de (50.000 A).....	25.000.000 Kw
Frecuencia causada por cada impacto del rayo en un elemento (ELF).....	1 Hz
Distancia de recorrido de la señal del rayo en función de su intensidad.....	299.000 km
Temperatura en el punto de impacto del rayo.....	8.000 a valores superiores a 27.000 Cº/µs
Propagación del sonido del rayo .....	340 m/s
Propagación del pulso electromagnético.....	299.900 Km/s

## ¿Por qué contratar nuestros servicios de auditorías?

### **Es importante conocer los posibles riesgo de accidentes de rayos como medida preventiva?**

No es suficiente decir «ya tengo un pararrayos que me protege» a no ser que estés seguro de ello.

El Cambio Climático tampoco ayuda, en los últimos años la actividad de rayos es incontrolable e impredecible, con impactos de rayos en 2019 a superar los 200.000 amperios en el Prat del Llobregat, cuestionando si los sistemas de protección directa e indirecta de los rayos están preparados para asumir tales energías.

En la base de datos ARIA, del MINISTÈRE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET SOLIDAIRE / DIRECTION GÉNÉRALE DE LA PRÉVENTION DES RISQUES / SERVICE DES RISQUES TECHNOLOGIQUES / BARPI, justifica esa necesidad, en su base de datos tienen registrados más de 200 accidentes en Francia a causa de impactos de rayos en industrias desde el año 1866 al 2019, cuantificando pérdidas de vidas humanas y económicas sobre todo en las grandes industrias.

En sus conclusiones, afirma la necesidad de revisar las instalaciones de protección contra los efectos de los rayos en el análisis de la prevención y riesgo de accidentes y en los métodos de gestión de riesgos. El objetivo es anticiparse al accidente en la gran industria donde el rayo está afectando a las instalaciones sensibles a sufrir un incendio o explosión con riesgo de accidentes y muertes de trabajadores y la contaminación ambiental como son los depósitos con productos inflamables, tuberías, equipos eléctricos, electrónicos, etc. y, por otro lado, de implementar una estrategia de prevención y protección real.

En nuestra web podéis descargar el informe de ARIA,

[www.pararrayos-pdce.com](http://www.pararrayos-pdce.com)