



	página
3.1 Introducción	3/3
3.2 Características de las descargas	3/3
3.3 La formación de tormentas	3/4
3.4 El fenómeno de los rayos	3/6
3.5 Principales efectos de los rayos	3/10
3.6 Tipos de sobretensiones transitorias atmosféricas	3/10
3.7 Modos de propagación	3/13
3.8 Consecuencias de las sobretensiones transitorias atmosféricas	3/13
3.9 Conclusión	3/17

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

3.1 Introducción

Las descargas atmosféricas son uno de los fenómenos naturales más espectaculares y comunes. En los dos siglos transcurridos desde que Benjamin Franklin demostró en 1752 que el rayo era una descarga eléctrica gigantesca, relámpagos, rayos y tormentas han sido objeto de numerosas investigaciones científicas.

Sin embargo, pese a la avalancha de nuevos equipos, los orígenes de las descargas atmosféricas y del mecanismo mediante el cual se electrifican las nubes continúan mostrándose esquivos.

La dificultad reside en la propia física de la descarga y de las tormentas, que abarca una escala de 15 órdenes de magnitud. Desde Franklin, se ha aceptado que el relámpago es el paso de carga eléctrica, positiva o negativa, de una región de la nube a otra y el rayo, el tránsito equivalente de la nube a tierra.

Se estima que en nuestro planeta existen simultáneamente unas 2.000 tormentas y que cerca de 100 rayos descargan sobre la tierra cada segundo. En total, esto representa unas 4.000 tormentas diarias y unos 9 millones de descargas atmosféricas cada día.

Según estudios realizados por el departamento de teledetección del Instituto Nacional de Meteorología (INM) durante el período del 28 de enero de 1992 hasta el 31 de enero de 1995, se observaron 1.615.217 impactos de rayos en España, lo que equivale a una media de 538.405 impactos observados por año.

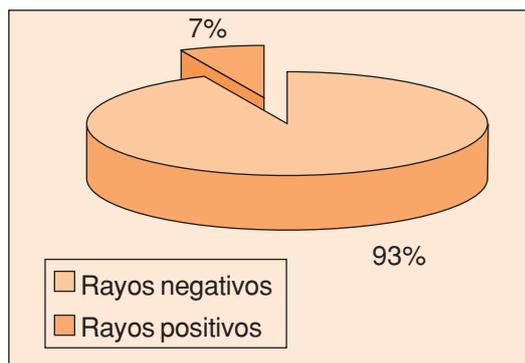


Fig. 3.1. Caída de rayos en España durante un período de tres años.

La caída de rayos y, por tanto, las sobretensiones transitorias de origen atmosférico representan un serio problema que se debe tener en cuenta.

3.2 Características de las descargas

Las descargas atmosféricas son impredecibles. Diferentes estudios y pruebas de campo permiten conocer algunos datos escalofriantes. Por ejemplo, sabemos que la temperatura máxima de un rayo puede alcanzar valores superiores a 30.000 °C con una duración de una millonésima de segundo. Esta temperatura supera más de cuatro veces la de la superficie del sol.

La longitud de la descarga vertical es normalmente de 5 a 7 km (fig. 3.2), mientras que en una descarga horizontal oscila entre 8 y 16 km. Los valores eléctricos que componen el rayo son enormes y pueden descargar intensidades de 200 kA con una energía total inmensa. La energía media disipada por unidad de longitud del canal de descarga formado por un simple rayo es del orden de 10^5 J/m, lo que equivale a unos 100 kg de dinamita. La energía media total por descarga es de 3×10^8 J y su duración total se considera que es de aproximadamente 30 ms. Así, la potencia media por rayo es de unos 10^{13} W. Cada rayo, en promedio, consta de 4 descargas separadas de 40 ms.



Fig. 3.2. Descargas verticales (rayos).

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

Considerando la energía y las 100 descargas/segundo que caen, la energía eléctrica global total disipada en un año es de aproximadamente 10^9 kW/h, lo que equivale a 1/117 parte de la producción eléctrica española de 1988.

3.3 La formación de tormentas

Aunque también se han observado relámpagos y rayos durante tormentas de nieve, de polvo, explosiones nucleares y erupciones volcánicas, los relámpagos y los rayos más visibles y audibles (truenos) se asocian con las nubes *cumulonimbus* (fig. 3.3), vulgarmente llamadas nubes de tormenta. Se reconocen por la forma de yunque y tienen un color más oscuro en su base.

Las tormentas se clasifican en: tormentas de masa de aire (de calor) y tormentas organizadas.



Fig. 3.3. *Cumulonimbus*.

Las tormentas de masa de aire se forman independientemente y duran entre una y dos horas, produciendo descargas atmosféricas moderadas, vientos, lluvia y, ocasionalmente, granizo.

Las tormentas frontales son amplias, violentas y duran varias horas. Están asociadas con los frentes atmosféricos fríos, producen fuertes descargas atmosféricas, fuertes vientos y, ocasionalmente, granizo. Éstas son las más destructivas.

El desarrollo de una tormenta es el siguiente:

■ Desarrollo eléctrico de una nube tormentosa

En una tormenta de verano, el desencadenamiento del proceso se debe a la elevación de aire caliente del suelo que se carga de humedad y produce una nube (fig. 3.4).

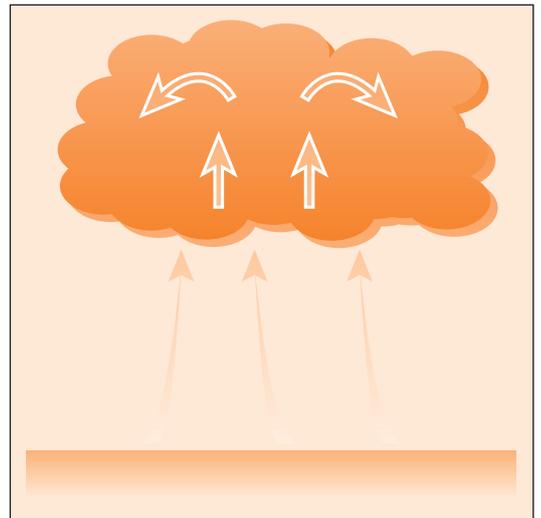


Fig. 3.4. *Cumulonimbus*: formación de una nube.

■ Fenómeno de electrificación

La violencia de las corrientes de aire ascendentes y descendentes, características de estas nubes, separan las gotas de agua. Debido a las bajas temperaturas que se dan en esas altitudes, estas gotas se transforman en cristal de hielo, que entran en colisión entre ellas, y crean cargas eléctricas positivas y negativas (fig. 3.5).

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

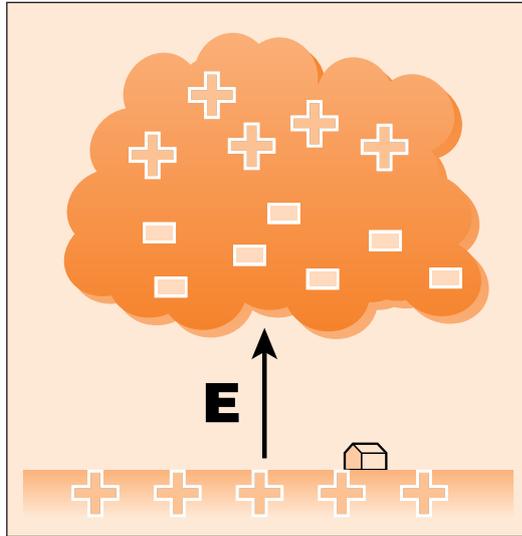


Fig. 3.5. Inicio del mecanismo de electrificación.

■ Fenómeno de la fase activa

Por un lado, las cargas de signo contrario se separan. Las cargas positivas formadas por cristales de hielo se sitúan en la parte superior de la nube, mientras que las negativas lo hacen en la inferior. Sin embargo, una pequeña cantidad de cargas positivas permanece en la base de la nube.

Las primeras chispas entre nubes comienzan a aparecer cuando se entra en la fase de desarrollo (fig. 3.6).

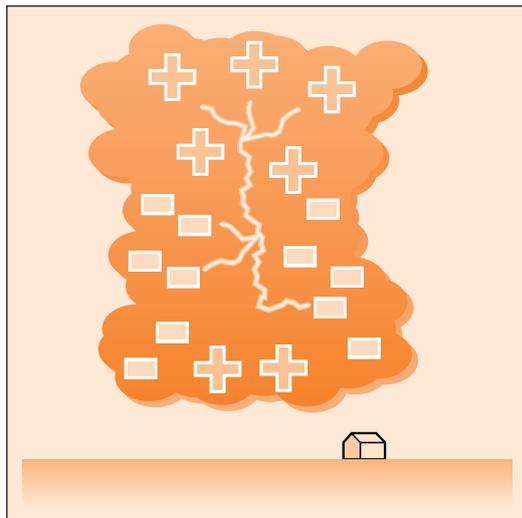


Fig. 3.6. Inicio de la fase activa.

■ Maduración de la fase activa

Esta nube eléctricamente equivale a un enorme condensador respecto al suelo. En el tiempo que transcurre desde que aparecen las primeras chispas dentro de la nube, comienzan a producirse relámpagos entre la nube y el suelo denominados *pulsos de rayo*. A continuación, aparecen las primeras lluvias (fig. 3.7).

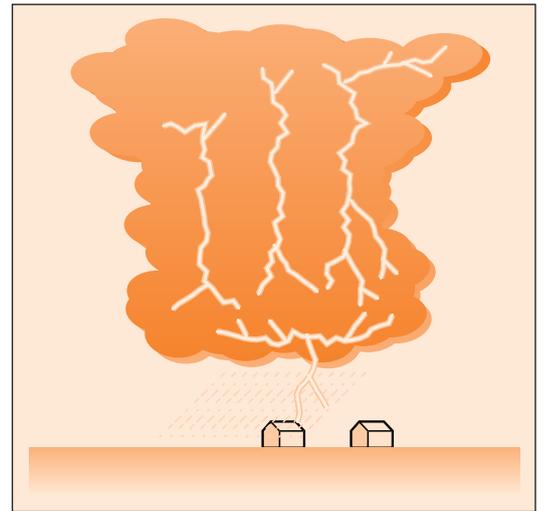


Fig. 3.7. Maduración.

■ Fin de la fase activa

La actividad de la nube disminuye mientras que los rayos hacia el suelo aumentan normalmente acompañados de fuertes precipitaciones, granizo y fuertes ráfagas de viento. En esta fase, se vacían centenares de miles de toneladas de agua que contenía la nube (fig. 3.8).

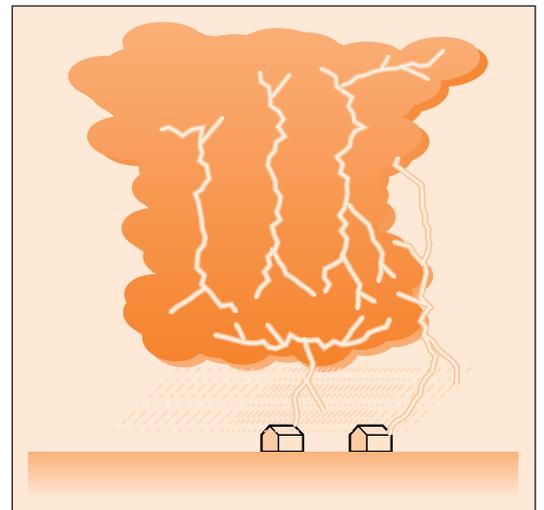


Fig. 3.8. Fin de la fase activa.

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

El Mediterráneo occidental constituye una especie de cubeta, al estar rodeado de sistemas montañosos de cierta importancia.

Esta situación produce con frecuencia la formación de una masa de aire muy húmeda y relativamente cálida a finales de verano y en otoño.

Cuando las condiciones son favorables para su ascenso, se pueden desencadenar potentes tormentas que liberan la energía potencial calorífica acumulada en el mar durante períodos de calma estival.

En invierno, la precipitación suele ir asociada a perturbaciones de carácter sinóptico (paso de frentes). En primavera, las tormentas se producen normalmente en zonas del interior, a causa del calentamiento del suelo y desaparecen cuando se adentran en el mar.

3.4 El fenómeno de los rayos

Usualmente, los rayos empiezan en la base de la nube en un punto cuyo campo eléctrico es del orden de los 30.000 V/m. Cada componente del rayo sólo dura unas décimas de milisegundo y es lo que se denomina *descarga*.

Los tipos de descargas atmosféricas más importantes son: relámpagos entre nubes, relámpagos internos en la nube, relámpagos nube-aire y los rayos (nube-tierra o tierra-nube).

No obstante, la mayor transferencia de carga se debe a las descargas efectos corona: con la aparición de una tormenta el campo eléctrico del suelo, que puede pasar de unos 120 V/m a unos 15 kV/m (**fig. 3.9**), puede acentuarse por las irregularidades del terreno, como colinas, árboles o edificios, creando un efecto de punta que lo amplifica de manera local unas 300 veces (**fig. 3.10**).

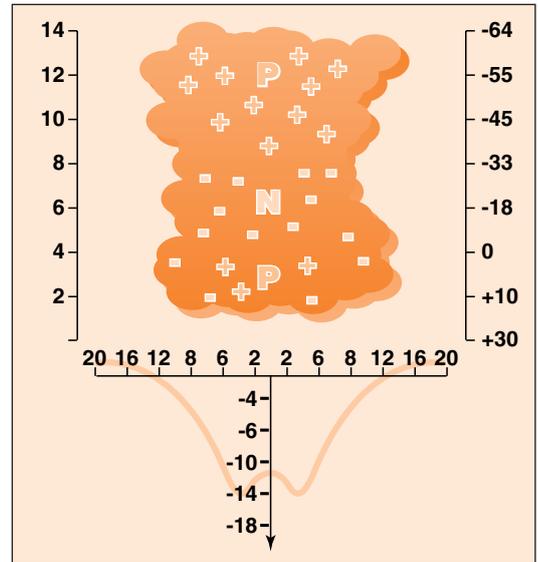


Fig. 3.9. Campo eléctrico en el suelo.

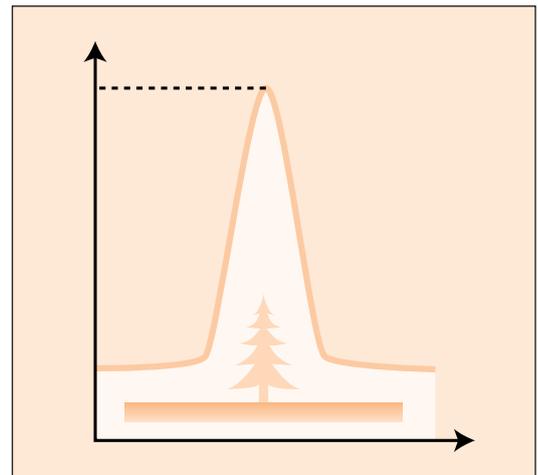


Fig. 3.10. Campo eléctrico amplificado por una irregularidad en el terreno.

Existen numerosos ejemplos observados desde la antigüedad, como el efecto sobre las puntas de las lanzas y objetos puntiagudos o sobre las puntas de los mástiles de los barcos, denominado por los marineros *fuego de San Telmo*.

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

Principio de una descarga

Una porción de la energía de una descarga atmosférica se disipa en forma acústica (trueno) y otra mucho mayor (75%) se disipa en forma de calor, alcanzando una temperatura en el canal de descarga de 15.000 a 30.000 °C y, como consecuencia, la presión de los gases puede llegar a unas 100 atmósferas.

Para explicar el principio de una descarga, se ha tomado como ejemplo un rayo negativo descendente, pues es el más común en España.

El fenómeno de descarga puede explicarse según 4 fases (**fig. 3.11**):

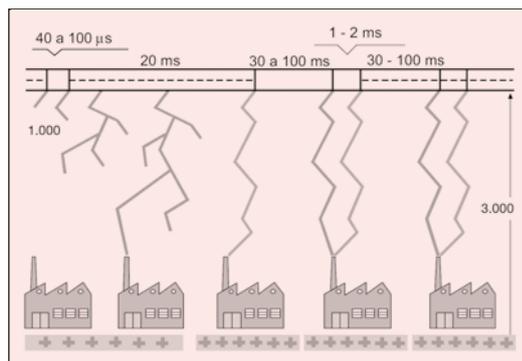


Fig. 3.11. Etapas de una descarga.

1. El rayo comienza por un trazo que se desarrolla a partir de una nube y progresa bandeando sucesivamente de 30 a 50 m del suelo. El trazo está compuesto de partículas eléctricas arrancadas de la nube por el campo eléctrico creado entre éste y el suelo. Éstas forman un canal luminoso que se dirige hacia el suelo.

2. Se crea un canal ionizado que se va ramificando, y llega a 300 m del suelo. El efluvio eléctrico (o canal de chispas) sale desde el suelo y alguna chispa entra en contacto con el elemento.

3. Aparece en este momento un arco eléctrico muy luminoso que provoca el trueno (el trueno es el sonido de la explosión a lo largo de todo el canal de descarga y su larga duración en comparación con el rayo se debe a las numerosas reflexiones del sonido) y que permite el intercambio de carga del condensador equivalente a efectos eléctricos nube-suelo.

El rayo principal parte desde el suelo hasta la nube con una velocidad de propagación cercana a 1/3 de la de la luz. Este arco de retorno se caracteriza por ser un impulso de duración total cercana a los 100 µs y un frente creciente de 1 a 15 µs.

4. Después aparece una sucesión de arcos llamados arcos subsiguientes. Entre estos arcos, subsiste un trazo continuo que hace circular una corriente del orden de 200 A, forzando así la descarga de una parte importante de las cargas del condensador.

Sin embargo, estos arcos poseen una variación de intensidad muy fuerte (di/dt) que provocan fenómenos muy peligrosos de inducción, mientras que el primer arco provoca problemas principalmente térmicos.

La potencia desencadenada crece aproximadamente con la quinta potencia del tamaño de la nube: duplicar las dimensiones de la nube implicaría multiplicar la potencia por 2^5 .

Las grandes tormentas pueden llegar a producir rayos a razón de más de 100 descargas por minuto. Este tipo de descargas pueden ser de cuatro tipos diferentes:

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

■ Clasificación de los rayos (según K. Berger)

Los rayos se clasifican según el sentido de su desplazamiento y la polaridad de la nube que se descarga.

- Según la polaridad de la nube:
 - Rayo negativo: cuando la nube está cargada negativamente y la tierra, positivamente. Los rayos negativos son muy frecuentes en lugares en los que el terreno es llano y el clima templado.

Aproximadamente, el 90% de los rayos son negativos.

- Rayo positivo: cuando la nube está cargada positivamente y la tierra, negativamente. Estos rayos son muy extraños y peligrosos.

- Según el sentido de desplazamiento:
 - Rayo descendente: cuando el rayo se dirige de la nube al suelo. Este tipo de rayo es muy frecuente en climas cálidos y donde el terreno es muy llano.

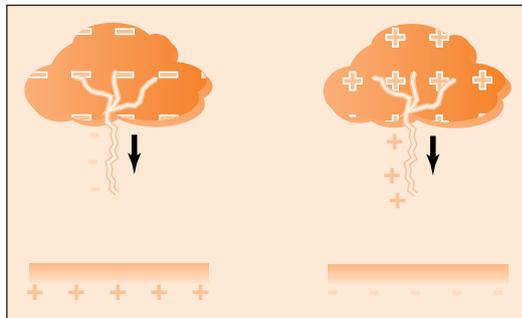


Fig. 3.12.

- Rayo ascendente: cuando el rayo se dirige desde el suelo hasta la nube. Este tipo de rayo, mucho más destructivo que el anterior, se crea, especialmente, en lugares montañosos o donde existen prominencias importantes.

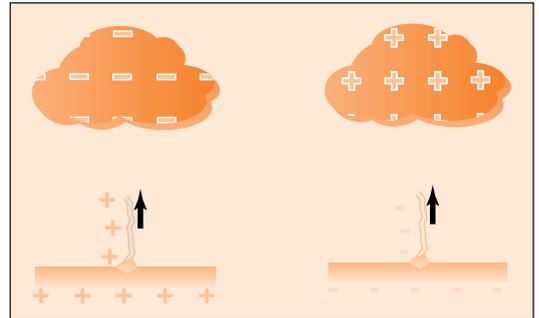


Fig. 3.13.

Existen, por lo tanto, cuatro combinaciones posibles de rayos:

- Rayo negativo descendente (fig. 3.12).
- Rayo negativo ascendente (fig. 3.13).
- Rayo positivo descendente (fig. 3.12).
- Rayo positivo ascendente (fig. 3.13).

De estos cuatro tipos, los más comunes y menos peligrosos serían los negativos descendentes (suponen el 95% de los rayos). Los menos comunes (menos del 1% de los rayos), pero más peligrosos, son los positivos ascendentes.

■ Parámetros característicos de los rayos

Los parámetros más importantes a la hora de estudiar el efecto del rayo son los siguientes:

- \hat{i}_{pico} : intensidad de pico para calcular el incremento de potencial de tierra.
- $(di/dt)_{\text{máx}}$: frente de subida para calcular las tensiones inducidas y las caídas de tensión a través de las inductancias, así como el espectro de frecuencias de la perturbación.
- i^2dt : parámetro de energía proporcional útil para calcular los efectos dinámicos (fuerzas resultantes).
- idt : carga eléctrica útil para calcular la volatilización de materia en el punto de impacto de la caída del rayo.

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

Para tener una guía de diseño, se establecen cuatro tipos de rayo correspondientes a las columnas 90, 50 y 10%, y máximo observado (bajo, típico, alto y extremo) (**tabla 3.1**).

Tanto la proporción como la intensidad de los rayos aumenta con la latitud geográfica. Los valores más altos se registran en la proximidad de los sistemas montañosos, los cuales favorecen la formación de tormentas de masa de aire al inducir ascensos forzados.

En el litoral mediterráneo, la presencia de un mar caliente y cadenas montañosas próximas a la costa ayuda al desarrollo de fenómenos convectivos.

En las zonas llanas, el número de días de tormenta es menor que en zonas próximas con más accidentes geográficos.

En el litoral andaluz, el viento procedente de África, muy seco, y la escasez de bosques y vegetación dificultan la formación de tormentas (**tabla 3.2**).

Parámetro	90% (bajo)	50% (típico)	10% (alto)	Máximo observado (extremo)
Corriente de pico	2 a 8 kA	10 a 25 kA	40 a 60 kA	230 kA
Velocidad de ascenso de la corriente (di/dt)	2 kA/μs	8 kA/μs	25 kA/μs	50 kA/μs
Duración total del rayo	0,01 a 0,1 s	0,1 a 0,3 s	0,5 a 0,7 s	1,5 s
Duración de un simple impulso o descarga	0,1 a 0,6 ms	0,5 a 3 ms	20 a 100 ms	400 ms
Intervalo de tiempo entre impulsos	5 a 10 ms	30 a 40 ms	80 a 130 ms	500 ms
Intervalo de tiempo entre el principio y la mitad del valor de pico en el lado de caída	10 a 25 μs	28 a 42 μs	52 a 100 μs	Más de 120 μs
Tiempo hasta el valor de pico	0,3 a 2 μs	1 a 4 μs	5 a 7 μs	10 μs
Número de impulsos o descargas en un rayo individual	1 a 2	2 a 4	5 a 11	34

Tabla 3.1. Parámetros característicos de cuatro tipos de rayos tipificados (bajo, típico, alto y extremo).

	Rayo negativo	Rayo positivo
Marítima	31 kA	53-61 kA
Litoral		47 kA
Mesetaria	23 kA	54 kA
Montañosa		57 kA

Tabla 3.2. Intensidad media de descarga de los rayos en función de la zona geográfica.

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

3.5 Principales efectos de los rayos

La corriente de rayo es una corriente eléctrica de alta frecuencia, del orden de 1 MHz. Además de los efectos de inducción y de sobretensiones importantes, provoca los mismos efectos que toda corriente de alta frecuencia cuando circula por un conductor.

■ **Efectos térmicos:** fusión en los puntos de impacto del rayo y efecto Joule debido a la circulación de corriente, pudiendo provocar incendios.

■ **Efectos electrodinámicos:** las corrientes de rayo circulan por los conductores paralelos creando unas fuerzas de atracción o repulsión entre los cables y provocando roturas o deformaciones mecánicas (cables aplastados).

■ **Efectos de deflagración:** el canal de rayo provoca una dilatación del aire y una compresión hasta unos 10 m de distancia. Un efecto de onda de choque rompe los vidrios y tabiques, y puede proyectar a personas o animales a algunos metros de distancia. Esta onda se transforma al mismo tiempo en onda sonora: trueno.

■ **Las sobretensiones conducidas** por un impacto sobre las líneas aéreas de alimentación eléctrica, telefónica o de datos.

■ **Las sobretensiones inducidas** por el efecto de la radiación electromagnética del canal de rayo.

■ **La elevación de potencial de la tierra** debida a la corriente de rayo en el suelo.

3.6 Tipos de sobretensiones transitorias atmosféricas

Las líneas aéreas, los cables suspendidos y los enterrados, pueden resultar dañados directamente por los rayos o recibir una influencia eléctrica de mayor o menor grado de las descargas atmosféricas próximas. Se distinguen tres tipos de sobretensiones atmosféricas en función de la caída del rayo:

■ **Sobretensiones transitorias conducidas (fig. 3.14a)**

La caída de un rayo directo sobre una línea de distribución de energía o de comunicaciones (línea telefónica) crea una onda de corriente que se propaga por ambas partes del punto de impacto. Esta sobretensión, que puede propagarse varios kilómetros, acabará llegando a los equipos del usuario y derivándose a tierra por medio de estos equipos, a los que producirá averías o su destrucción.

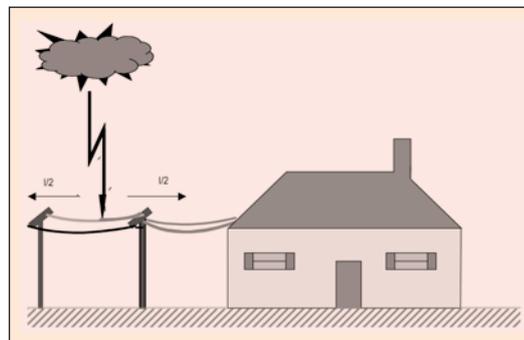


Fig. 3.14a. Sobretensiones transitorias conducidas.

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

■ **Sobretensiones transitorias inducidas (fig. 3.14b)**

La caída de un rayo sobre un poste, árbol o irregularidad en el terreno será equivalente a una antena de gran longitud que emite un campo electromagnético muy elevado (tabla 3.3). La radiación emitida (tan importante como el frente creciente de corriente radiado, de 50 a 100 kA/μs) induce corrientes transitorias en las líneas eléctricas o telefónicas, transmitiéndolas al interior de la instalación y provocando averías o la destrucción de los equipos conectados.

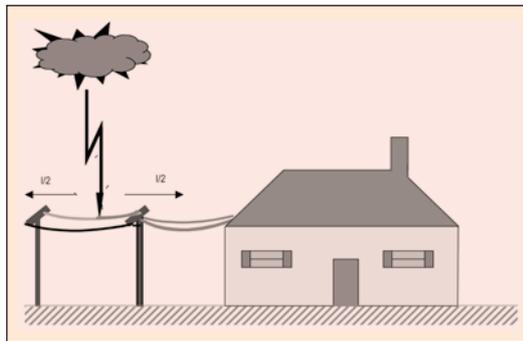


Fig. 3.14b. Sobretensiones transitorias inducidas.

■ **Sobretensiones transitorias debidas al aumento de potencial de tierra (fig. 3.14c)**

La caída de un rayo sobre el terreno o en un pararrayos provoca una fuerte elevación del potencial de tierra en una zona de algunos kilómetros (si el rayo cae en un pararrayos, el potencial de tierra aumentará cuando éste dirija la corriente a tierra). Este aumento de potencial puede inducir sobretensiones elevadas en los cables subterráneos y provocar la elevación de la tensión de las conexiones a tierra (tabla 3.4).

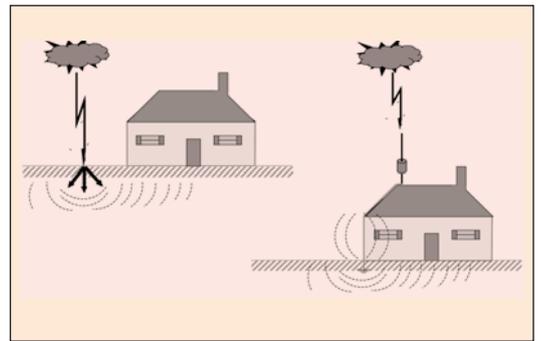


Fig. 3.14c. Sobretensiones transitorias debidas al aumento del potencial de tierra.

Pico de intensidad del rayo (kA)	Campo magnético estático generado por el rayo (A/m)		
	a 10 m del rayo	a 100 m del rayo	a 10 km del rayo
10	1,6210 ²	16	1,9210 ⁻²
20	3,2210 ²	32	3,8210 ⁻²
30	4,8210 ²	48	5,8210 ⁻²
70	1,12210 ³	1,1210 ²	13.210 ⁻²
100	1,6210 ³	1,6210 ²	19.210 ⁻²
140	2,2210 ³	2,2210 ²	27.210 ⁻²
200	3,2 × 10 ³	3,2 × 10 ²	38 × 10 ⁻²

Tabla 3.3. Campo magnético estático generado por el rayo (A/m), en función de la intensidad del rayo, medido a distintas distancias del punto de impacto.

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

Diferencia de potencial en V, kV o MV							
X en metros (distancia axial)							
Distancia D en metros	10	20	30	50	70	100	200
10	796 K	1,06 M	1,19 M	1,33 M	1,39 M	1,45 M	1,52 M
15	424 K	606 K	707 K	816 K	874 K	923 K	987 K
20	265 K	398 K	477 K	568 K	619 K	663 K	723 K
30	133 K	212 K	265 K	332 K	371 K	408 K	461 K
40	79,6 K	133 K	171 K	221 K	253 K	284 K	332 K
50	53,1 K	91,9 K	119 K	159 K	186 K	212 K	255 K
70	28,4 K	50,5 K	68,2 K	94,7 K	114 K	134 K	168 K
100	10,5 K	26,5 K	36,7 K	53,1 K	65,5 K	79,6 K	106 K
150	6,6 K	12,5 K	17,7 K	26,5 K	33,8 K	42,4 K	60,6 K
200	3,8 K	7,2 K	10,4 K	15,9 K	20,6 K	26,5 K	39,8 K
300	1,7 K	3,3 K	4,8 K	7,6 K	10,0 K	13,3 K	21,2 K
400	970	1,9 K	2,8 K	4,4 K	5,9 K	8,0 K	13,3 K
500	624	1,2 K	1,8 K	2,9 K	3,9 K	5,3 K	9,1 K
700	320	632	934	1,5 K	2,1 K	2,8 K	5,1 K
1 km	158	312	464	758	1,0 K	1,4 K	2,7 K
2 km	40	79	118	194	269	379	723
3 km	18	35	53	87	121	171	332
5 km	6	13	19	32	44	62	122
10 km	2	3	5	8	11	16	31

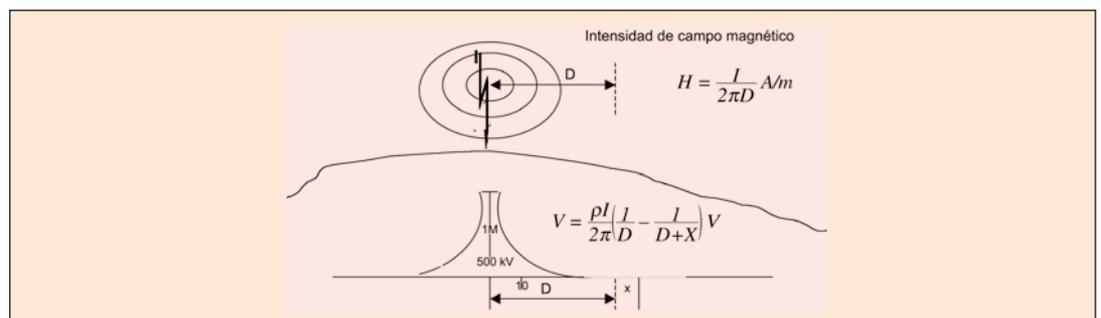


Tabla 3.4. Diferencia de potencial en el suelo producida por un rayo de 100 kA con una resistividad del suelo de 1 kW/m.

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

Dado que la conductividad del suelo tiene valores finitos, la corriente de descarga se distribuye por debajo de la superficie de la tierra en todas las direcciones, con zonas de alta conductividad que toman una mayor parte de la corriente y la transportan a largas distancias, hasta que se establece el equilibrio de potencial final en el suelo situado por debajo de la nube.

El efecto de protección de tierra depende, en gran parte, de la conductividad del suelo, pues cuanto mayor conductividad, menor sobretensión en el suelo.

3.7 Modos de propagación

Las sobretensiones de origen atmosférico pueden propagarse de 2 modos diferentes: el común o asimétrico y el diferencial o simétrico.

■ Sobretensión transitoria en modo común o asimétrico

Perturbaciones entre un conductor activo y el de tierra (fase/tierra o neutro/tierra).

Este tipo de sobretensiones es peligroso para los aparatos en los que la masa está conectada a la tierra, debido a los riesgos de ruptura de la rigidez dieléctrica de los materiales.

■ Sobretensión transitoria en modo diferencial o simétrico

Perturbaciones entre conductores activos (fase-neutro).

Este tipo de sobretensiones son particularmente peligrosas para los equipos electrónicos y los materiales sensibles de tipo informático.

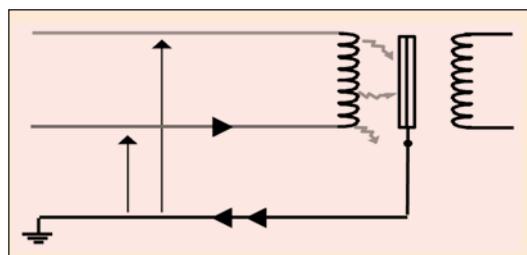


Fig. 3.15a. Sobretensiones transitorias conducidas.

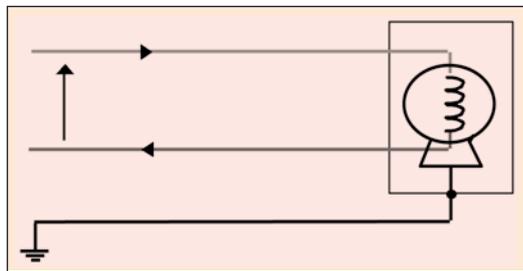


Fig. 3.15b. Sobretensión transitoria en modo diferencial.

3.8 Consecuencias de las sobretensiones transitorias atmosféricas

Las consecuencias principales de las sobretensiones atmosféricas vienen dadas por el acoplamiento de corrientes punta en los cables de señales.

■ Acoplamiento del campo al cable. Tensiones inducidas

El campo electromagnético generado durante la caída de un rayo se acopla a todos los cables suficientemente cercanos generando sobretensiones de modo común o diferencial, que se propagan rápidamente (fig. 3.16).

■ Acoplamiento de cable a cable

A continuación, vamos a mostrar, con ayuda de algunos ejemplos, la forma en la que las corrientes de punta pueden acoplarse, óhmica, inductiva y capacitivamente, en los cables de señales de instalaciones muy extensas.

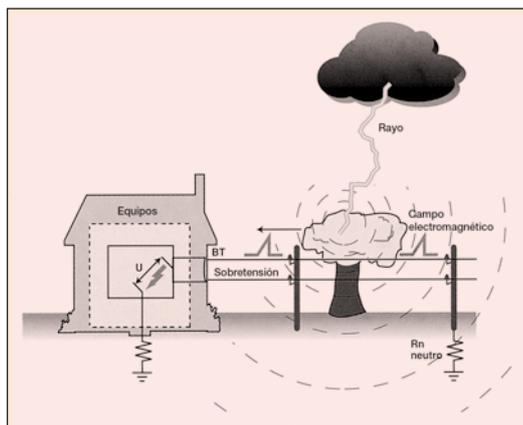


Fig. 3.16. Acoplamiento del campo al cable.

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

Se partirá de la disposición en la que un aparato 1 está situado en un edificio 1 y un aparato 2, en otro edificio 2, de manera que estén conectados ambos aparatos entre sí por medio de un cable de señales.

Además, ambos aparatos se encuentran conectados a la correspondiente barra colectora de compensación de potencia (PAS), por ejemplo, a través del conductor de protección PE, en los dos edificios.

□ Acoplamiento óhmico (**fig. 3.17a**).

Al producirse una descarga de un rayo en el edificio 1, en la resistencia óhmica de propagación R_{A1} tiene lugar una elevación de tensión de algunos centenares de kV.

Debido a estas altas tensiones, pueden perforarse los aislamientos de los receptores 1 y 2, de manera que después puede fluir una corriente de punta óhmica acoplada desde el PAS 1 a través del aparato 1, el cable de señales, el aparato 2 y el PAS 2, y la resistencia R_{A2} .

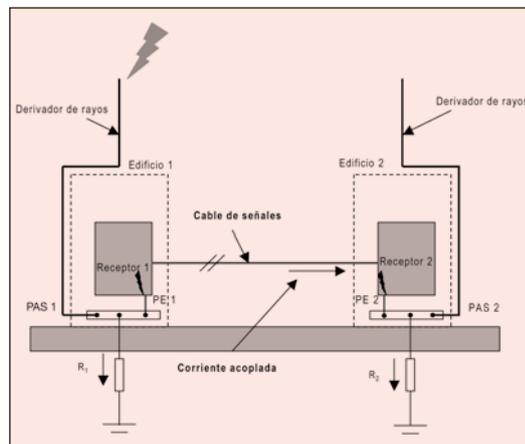


Fig. 3.17a. Acoplamiento óhmico.

La magnitud de corriente de punta acoplada (valor de cresta de la corriente de algunos kA) se determina por la relación entre las resistencias óhmicas R_{A1} y R_{A2} .

□ Acoplamiento inductivo (**figs. 3.17b1 y 3.17b2**).

Los campos magnéticos que se forman partiendo del canal del rayo o de los conductores recorridos por la corriente de rayo, inducen tensiones en los bucles metálicos.

Se observan dos fenómenos inductivos en las instalaciones:

– Bucle de inducción entre conductores de un cable de señales (**fig. 3.17b1**).

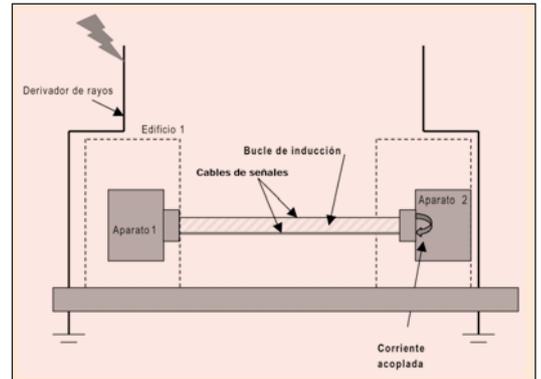


Fig. 3.17b1. Bucle de inducción entre conductores de un cable de señales.

Un cable de señales de dos hilos que une el aparato 1 con el aparato 2 forma un bucle de inducción en el cual, al descargar un rayo en el edificio 1 con su derivación a tierra por el pararrayos, se induce una tensión característica, denominada *tensión transversal* (expresada en kV), la cual tiene como consecuencia una corriente acoplada de hasta algunos kA.

Estas tensiones y corrientes suponen una carga excesiva para los componentes de las entradas o salidas de los receptores.

– Bucle de inducción entre cable de señal y tierra (**fig. 3.17b2**).

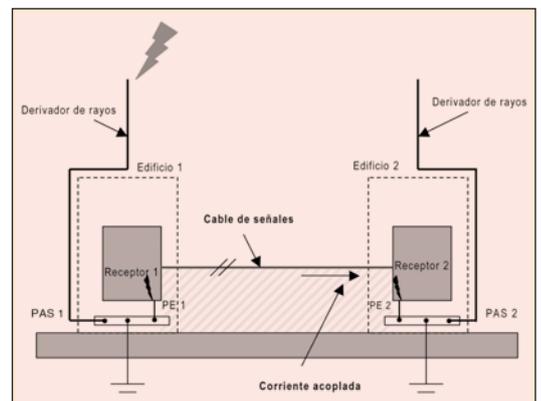


Fig. 3.17b2. Bucle de inducción entre cable de señal y tierra.

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

El bucle se crea entre el cable de señal y la tierra a la que están conectados los receptores.

Al descargar un rayo en un edificio, se induce en el bucle una sobretensión (de algunas decenas de kV) que provoca una perforación en los aislamientos de los receptores y una corriente acoplada de algunos kA.

□ Acoplamiento capacitivo (fig. 3.17c).

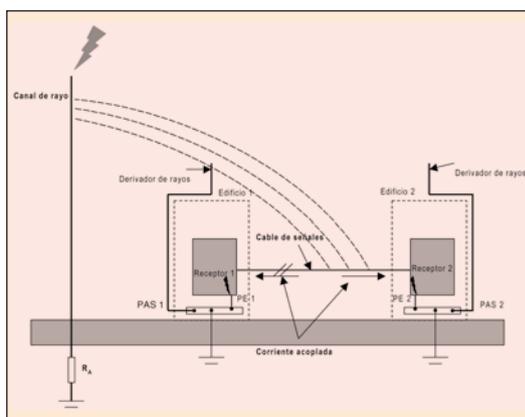


Fig. 3.17c. Acoplamiento capacitivo.

Cuando descarga un rayo sobre la tierra o sobre un pararrayos, el canal del rayo o el derivador de rayos, como consecuencia de la caída de tensión en la resistencia de propagación R_a , experimenta una elevación de tensión de algunos cientos de kV frente al entorno.

El cable de señales entre los dos aparatos está acoplado capacitivamente con uno de esos canales de rayo o con el pararrayos.

Las capacidades de acoplamiento (condensadores) se cargan y dan lugar a una corriente acoplada de algunas decenas de A, la cual tras producir perforaciones de los receptores, fluye finalmente a tierra.

□ Inducción en el bucle de masas (fig. 3.17d). Un cable de señal une un microordenador y su impresora aislados galvánicamente. Cada aparato está unido a tierra por un cable de alimentación que sigue un camino diferente que el cable de señal.

La sobretensión generada es proporcional a la superficie creada por los dos cables. Por ejemplo, para una superficie de 300 m^2 , ante la aparición de un rayo de $100 \text{ kA}/\mu\text{s}$ a 400 m , la sobretensión inducida en modo común en el cable de señal será de alrededor de 15 kV .

■ Tensiones de aislamiento o perforación en circuitos de instalaciones eléctricas de baja tensión (tabla 3.5)

Como se ha comentado en capítulos anteriores, las sobretensiones pueden producirse por descargas directas o indirectas de rayo.

En el caso de descargas directas de rayo, están primero los elevados parámetros de las corrientes de rayo, que cuentan, en este caso, con intensidades muy elevadas (de

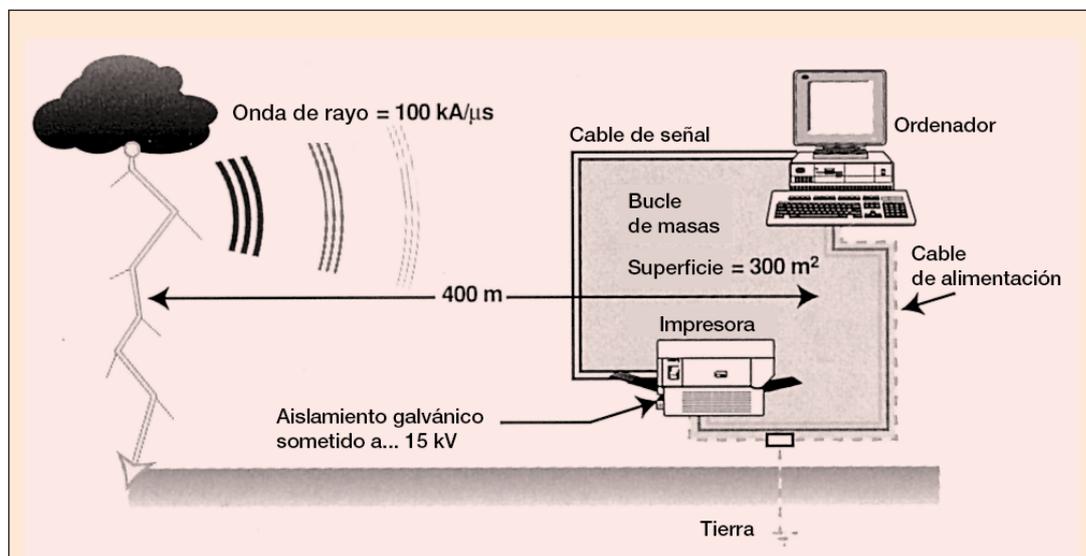


Fig. 3.17d. Inducción en el bucle de masas.

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

Aparatos/cables/conducciones		Sobretensión de descarga en la onda estándar 1,2/50
Derivación carcasa/tierra	Receptores de corriente de alta intensidad	5...8 kV
	Receptores de telecomunicaciones	1...3 kV
Tensiones transversales entre bornas de entrada de receptores y circuitos electrónicos	Circuitos con componentes discretos (resistencias, condensadores, bobinas...)	0,5...5 kV
	Circuitos integrados TTL	50...100 V
	Circuitos integrados bipolares BJT y amplificadores operacionales	50...300 V
	Circuitos integrados MOS y CMOS	70...100 V
Cable de telecomunicaciones		5...8 kV
Canal de señal y medida		< 20 kV
Cables de corriente de alta intensidad		< 30 kV

Tabla 3.5. Tensiones de aislamiento o perforación en circuitos e instalaciones eléctricas de B.T.

entre 20 kA y 150 kA), y pueden aparecer, al mismo tiempo, puntas de tensión de algunos cientos de kV.

En el caso de las descargas de rayo lejanas, las intensidades que aparecen son relativamente pequeñas y la sobretensión que se crea es de algunas decenas de voltios.

Estas sobretensiones (ya sean elevadas o bajas) afectan a los distintos elementos de las instalaciones de baja tensión y pueden producir perforaciones en los aislamientos y, por tanto, fugas a tierra.

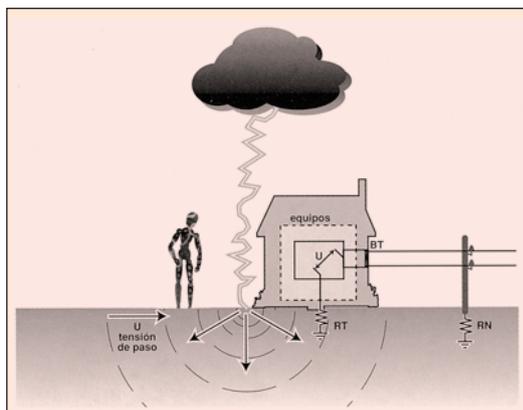


Fig. 3.18. Subida del potencial de tierra.

En la tabla 3.5, se presentan de modo aproximado la capacidad de los receptores, teniendo en cuenta que en todo caso dependerá del fabricante que se ajusten más o menos a estos valores. La resistencia a la tensión de algunos componentes electrónicos, empleados en algunas instalaciones es, únicamente, de algunos voltios.

■ Subida del potencial de la toma de tierra

La caída de un rayo en el suelo o en un pararrayos puede generar una corriente de rayo que se propagará por el suelo según la naturaleza del suelo y de la toma a tierra.

Dado que la conductividad del suelo tiene valores finitos, la corriente de descarga se distribuye por debajo de la superficie de tierra en todas las direcciones, con zonas de alta conductividad (con conductores metálicos) que toman parte de la corriente y la transportan a largas distancias hasta que se establece el equilibrio de potencial final en el suelo situado por debajo de la nube.

Para una corriente de rayo de 30 kA y una toma de tierra excelente de 2 W, la subida del potencial de masas será, según la ley de Ohm, de 60 kV con relación a la red.

La subida de potencial de los equipos se realizará independientemente de la red, que puede ser aérea o subterránea.

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

3.9 Conclusión

Los elevadísimos valores de las sobretensiones originadas por las descargas de rayos (directas o indirectas), deberán reducirse a valores tolerables, claramente por debajo de las tensiones de descarga o de perforación, mediante el empleo de los

adecuados aparatos de protección contra sobretensiones. Si se tratara de conseguir una protección, incluso en el caso de descarga directa de rayo, los aparatos de protección empleados deberían estar en condiciones de derivar, sin destruirse, elevadas corrientes parciales de rayo.

Lista de lugares expuestos a los rayos

Tipo de estructura	Efectos del rayo
Vivienda individual	Perforación de las instalaciones eléctricas, incendios y degradación material. Degradaciones limitadas normalmente a los objetos que se encuentran en el punto de impacto del rayo o en la trayectoria del mismo.
Inmueble de vivienda colectiva	Deterioro de las instalaciones colectivas: eléctricas, antenas de TV, detección de incendios y control de accesos. Riesgo de incendio en los locales técnicos comunes y protecciones técnicas (distribución de energía y redes de comunicación). Parada de las instalaciones: ascensor, climatización, VMC.
Edificio agrícola	Riesgo principal de incendio y saltos de tensión peligrosos. Riesgo secundario debido a la pérdida de energía eléctrica con riesgo de muerte para el ganado, como resultado de una avería del sistema de control electrónico de las instalaciones de ventilación, alimentación de nutrición...
Teatros, colegios, grandes almacenes, instalaciones deportivas	Degradaciones en las instalaciones eléctricas (p. ej. las de alumbrado público); que conllevan probablemente un efecto de pánico. Avería de los sistemas contra incendios que conllevan retraso a la hora de reaccionar.
Bancos, compañías de seguros, sociedades mercantiles	Además de los problemas antes mencionados: problemas relativos a la pérdida de comunicación, averías en los ordenadores y pérdida de datos.
Hospitales, guarderías, establecimientos penitenciarios, residencias de la tercera edad	Además de los problemas antes mencionados: problemas que afectan a los pacientes de cuidados intensivos y dificultades para socorrer a las personas inmovilizadas.
Museos y sitios arqueológicos	Pérdida de legado cultural irremplazable.
Industria manufacturera	Efectos adicionales en función del contenido de las fábricas: desde la degradación leve hasta los daños inaceptables con pérdida de producción.
Refinerías, gasolineras, fábricas de fuegos artificiales, fabricas de munición	Riesgo de incendio directo o indirecto, de explosión en edificios o cubas de almacenamiento. Riesgo de contaminación por los suelos y consecuencias económicas para la unidad de producción.
Fábricas químicas, bioquímicas y laboratorios	Incendios y funcionamiento defectuoso de las instalaciones, además de consecuencias nocivas para el entorno local y global. Riesgo de contaminación por los suelos y consecuencias económicas para la unidad de producción.
Centrales nucleares	Interrupción de la producción y distribución de energía a los usuarios.

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

Receptores sensibles- Instalaciones en edificios

- Vivienda individual
- Vivienda colectiva: apartamento
- Vivienda colectiva: copropiedad de inmueble

Categoría de aparato	Tensión de resistencia a choques (onda 8/20)					
	2,5 kV			1,5 kV		
	Viviendas			Viviendas		
Aparatos electrónicos audiovisuales						
Televisor	■	■				
Magnetoscopio	■	■				
Descodificador				■	■	
Motor de antena por satélite	■		□			
Amplificador de antena	■		□			
Aparatos electrónicos de sonido						
Cadena HI-FI				■	■	
Cine en casa "home cinema"				■	■	
Sonorizador				■	■	
Aparatos electrodomésticos programables						
Lavadora	■	■				
Lavavajillas	■	■				
Secadora	■	■				
Horno	■	■				
Aparatos telefónicos						
Teléfono digital				■	■	
Base de teléfono inalámbrico				■	■	
Contestador				■	■	
Transmisor telefónico				■	■	
Fax				■	■	
Material informático						
Ordenador personal				■	■	
Servidor				■	■	
Escáner				■	■	
Grabadora				■	■	

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

Receptores sensibles- Instalaciones en edificios

- Vivienda individual
- Vivienda colectiva: apartamento
- Vivienda colectiva: copropiedad de inmueble

Categoría de aparato	Tensión de resistencia a choques (onda 8/20)					
	2,5 kV			1,5 kV		
	Viviendas			Viviendas		
Impresora	■	■				
Discos y lectores externos				■	■	
Modems para Internet				■	■	
Ondulador	■		□			
Control de acceso						
Alarma contra intrusiones				■	■	□
Telefonillo				■	■	□
Portero de vídeo				■	■	□
Portal automático				■	■	□
Puertas corredizas				■	■	□
Cámaras de vídeo vigilancia				■	■	□
Aparatos de alumbrado						
Alumbrado exterior para jardines	■		□			
Alumbrado urbano	■		□			
Alumbrado de monumentos públicos	■		□			
Material de jardín y exteriores						
Toldos eléctricos	■	■				
Automatismos de riego				■		□
Bombas sumergidas	■		□			
Material de ocio						
Bombas de piscina	■		□			

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

Receptores sensibles Instalaciones en industria e infraestructuras

■ Muy aconsejada
□ Aconsejada

Categoría de aparato	Tensión de resistencia a choques (onda 8/20)			
	2,5 kV		1,5 kV	
	Muy aconsejada	Aconsejada	Muy aconsejada	Aconsejada
Redes de comunicación				
Antenas de radio FM			■	
Antenas de TV: VHF, UHF			■	
Antenas FH, PMR, 3RP, GSM, DCS			■	
Antenas parabólicas			■	
Antenas de radar			■	
Cámaras de vigilancia-Control de tráfico			■	
Postes y soportes de antenas de TV	■			
Postes de redes de comunicación	■			
Relé GSM	■			
Relé hertziano	■			
Sistema de antena		□		
Material informático				
Bastidor de exploración informática			■	
Autoconmutador telefónico			■	
Bucle de interconexión local			■	
Bucle de interconexión metropolitana			■	
Red de fibra óptica			■	
Ordenador en red			■	
Periféricos en red	■			
Plataforma de servidor en red	■			
Sistema ondulator	■			
Centro de almacenamiento en la web			■	
Gestion técnica y control				
Alarma técnica		□		
Central de gestión remota			■	
Central de vigilancia remota			■	

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

Receptores sensibles Instalaciones en industria e infraestructuras

■ Muy aconsejada
□ Aconsejada

Categoría de aparato	Tensión de resistencia a choques (onda 8/20)			
	2,5 kV		1,5 kV	
	Muy aconsejada	Aconsejada	Muy aconsejada	Aconsejada
Central de detección de incendios	■			
Gestión técnica de edificios		□		
Control a distancia			■	
Est. de medición de contaminación atmosférica	■			
Sistema de control de acceso			■	
Diagnóstico remoto, mantenimiento a distancia		□		
Transporte por cable				
Ascensor		□		
Funicular	■			
Montacargas	■			
Telecabina	■			
Teleférico	■			
Telesilla	■			
Telesquí		□		
Material de elevación				
Grúa imantada		□		
Grúa de obra		□		
Grúa portuaria		□		
Puente-grúa		□		
Producción y transporte de energía				
Catenaria ferroviaria	■			
Aeroturbina de bombeo	■			
Aeroturbina de producción de energía	■			
Panel solar	■			
Poste de media tensión	■			
Poste de baja tensión	■			
Poste de redes de comunicación	■			

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

Interés de instalar un sistema de protección contra los rayos en edificios residenciales o terciarios

- Vivienda individual
- Vivienda colectiva: apartamento
- Vivienda colectiva: copropiedad de un inmueble

Tipo de equipos para conectar	Realización de un enlace equipotencial de tierra y masa					
	Viviendas					
Canalización de agua	■					■
Canalización de gas	■					■
Cubeta metálica y cisterna enterradas	■					■
Antena y poste de antena TV	■					■
Blindaje del cable de antena TV	■					■
Blindaje de la red de TV por cable	■					■
Parabólica y soporte de parabólica de TV	■					■
Blindaje del cable de parabólica de TV	■					■
Antena y poste de antena de GSM						■
Blindaje del cable de antena de GSM						■
Alumbrado de baliza de inmueble de gran altura						■
Tipo de equipos a instalar	Instalación de un pararrayos					
Poste del pararrayos	■					■
Conductor de descenso	■					■
Contador de rayos						■
Toma de tierra interconectada a la del edificio	■					■
Tipo de receptores a proteger	Instalación con un pararrayos					
	Protec. de cabecera			Protección fina		
	Viviendas			Viviendas		
Aparatos de medida de potencia				■		
Cajetín de llegada de línea telefónica	■	■				
Cable de radio FM	■			■		
Cable de red de TV (UHF, VHF)	■			■		
Cable de parabólica de TV	■			■		
Amplificador de antena	■			■		
Alimentación de aparatos informáticos: microordenador, escáner, impresora, fax, módem, ondulator	■	■		■	■	

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

Interés de instalar un sistema de protección contra los rayos en edificios residenciales o terciarios

- Vivienda individual
- Vivienda colectiva: apartamento
- Vivienda colectiva: copropiedad de un inmueble

Tipo de receptores a proteger	Instalación con un pararrayos					
	Protec. de cabecera			Protección fina		
	Viviendas			Viviendas		
Alimentación de aparatos de HI-FI y vídeo: TV, vídeo, descodificador, demodulador, cadenas HI-FI, cine en casa "home cinema", sonorización	■	■		■	■	
Alimentación de aparatos electrodomésticos programables: lavadora, secadora, lavavajillas, horno	■	■		■	■	
Base de teléfono inalámbrico, contestador, transmisor, portátil, fax, módem	■	■		■	■	
Alimentación de automatismos colectivos: calefacción colectiva, puerta de garaje, bomba sumergida, motores de piscina, riego colectivo, climatización, VMC central de control de acceso, portero audio-vídeo	■		■	■		■
Alimentación de automatismos pequeños: calefacción, climatización, portero audio-vídeo, portal, puerta de garaje, puerta corrediza, toldo eléctrico, bomba sumergida, toldo de piscina, riego de jardín, VMC	■	■		■	■	
Alimentación de sistemas de alarma contra intrusiones, detección de incendios, alarma técnica, cámaras de vigilancia	■	■	■	■	■	
Gestión de sistemas de alumbrado colectivo			■			■
Alimentación de sistemas de alumbrado	■	■				
Otros aparatos eléctricos	■	■		■	■	

3. Sobretensiones transitorias de origen atmosférico

Interés de instalar un sistema de protección contra los rayos en edificios residenciales o terciarios

- Vivienda individual
- Vivienda colectiva: apartamento
- Vivienda colectiva: copropiedad de un inmueble

Tipo de receptores a proteger	Instalación con un pararrayos					
	Protec. de cabecera			Protección fina		
	Viviendas			Viviendas		
Línea de fabricación de proceso continuo	■				■	
Línea de fabricación de proceso discontinuo		■				
Central de alarmas y detección de incendios	■					
Informática de gestión de producción	■				■	
Informática de gestión de administración		■				
Informática de supervisión-servidores	■				■	
Informática individual-PC de oficina	■				■	
Informática de control de acceso	■					
Ondulador de grandes sistemas	■					
Ondulador de pequeños sistemas	■					
Telecomunicaciones internas y externas	■				■	
Circuito de vigilancia y control de vídeo	■				■	
Climatización de sala informática		■				
Calefac. de planta de producción-aire caliente		■				
Calefacción y climatización de oficinas		■				
Autómatas de gestión de energía	■				■	
Gestión técnica de oficinas	■				■	
Central de detección de incendios	■					
Central de aspiración y tratamiento de aire		■				
Extractor de evacuación de aire		■				
Compresor-motor		■				
Ascensor		■				
Bomba sumergida		■			■	
Cargador de baterías-carretilla elevadora		■				