

## La protección contra el rayo en la normativa española

### 1. Introducción

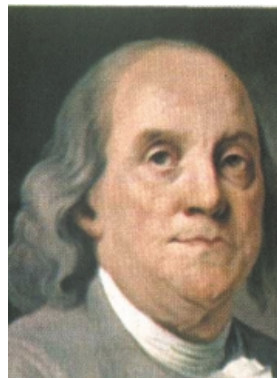
El principio de la protección contra rayos está basado en los experimentos de Franklin y consiste en atraer la descarga eléctrica, por medio de un pararrayos, y proporcionarle un camino a tierra de valor bajo de impedancia, de manera que la circulación de la corriente a tierra se realice sin influencias en las personas y bienes, teniendo en cuenta que las descargas llevan consigo, además de las acciones eléctricas, las térmicas y mecánicas debidas al alto valor de la corriente de las descargas. La regulación en España de los

sistemas de protección frente al rayo (SPCR), se ha visto reforzada por la edición de las normas UNE 21 185 y 21 286, la primera indicando los principios generales de la protección de las estructuras frente al rayo, en correspondencia con la norma CEI 61024-1(1990), y la segunda haciendo referencia al empleo de pararrayos con dispositivo de cebado (PDC), en correspondencia con la norma francesa NF C 17-102 (1995).

Como indican ambas normas, en sus introducciones respectivas, ningún sistema de protección contra rayos puede evitar la formación de los mismos, ni re-

**B. Hermoso Alameda, M.  
Aguado Alonso  
Dpto. Ingeniería Eléctrica  
y Electrónica.  
Universidad Pública  
de Navarra**

**P.M. Martínez Cid  
Iberdrola**



*Benjamín Franklin (1706-1790), físico, escritor y político norteamericano, creó diversas bibliotecas, un club de debate y una academia, al tiempo que ampliaba sus conocimientos en el campo de la filosofía y de la física, en el campo de la electricidad, formulando una teoría de la electrostática basada en la existencia de dos clases de electricidad de características opuestas, enunciando el principio de la conservación de la electricidad.*

*Descubrió el carácter eléctrico de los rayos atmosféricos e inventó el pararrayos*

presentan una garantía de protección absoluta contra ellos, pero si proporcionan los medios para reducir, de manera significativa, los riesgos por daños en las estructuras protegidas.

Dada la diversidad de estructuras existentes las propias normas marcan el alcance de sus contenidos, siendo válidos los principios generales en que se apoyan, para aquellas estructuras no recogidas directamente en ellas y que aún están pendientes de regulación, y así:

- UNE 21 185: su contenido es aplicable al diseño e instalación de SPCR para estructuras normales de hasta 60 m. de altura, no cubriendo:

- Ferrocarriles.
- Sistemas de generación, transporte y distribución de energía eléctrica exteriores a una estructura.
- Sistemas de telecomunicación exteriores a una estructura.
- Vehículos, navíos, aeronaves e instalaciones en el mar.

- UNE 21 186: especifica que su contenido es de aplicación, al igual que la UNE 21 185, a las estructuras corrientes de altura inferior a los 60 m. matizando, además de las estructuras corrientes, las zonas abiertas (áreas de almacenamiento, áreas de ocio, etc.), para lo que cita algunas estructuras en la que son necesarias un SPCR:

- Edificios o zonas abiertas con concurrencia de público.
- Edificaciones de gran altura y, en general, construcciones elevadas (pilares, depósitos de agua, faros, etc.).
- Construcciones y depósitos en los que se manipulen y/o contengan materiales peligrosos (explosivos, inflamables, tóxicos, etc.).
- Edificios que contengan equipos o documentos especialmente vulnerables o valiosos (instalaciones de telecomunicación, ordenadores, archivos, museos, monumentos históricos, patrimonios culturales, etc.) y, en general, estruc-

turas utilizadas para fines comerciales, industriales, agrícolas, administrativos o residenciales.

Para conseguir la protección ambas normas consideran dos sistemas de protección:

- Sistema externo, que comprende dispositivos captadores, derivadores o bajadas y toma de tierra.
- Sistema interno, que comprende los dispositivos que reducen los efectos electromagnéticos de la corriente de descarga atmosférica dentro del espacio a proteger, por medio de las conexiones equipotenciales y las distancias de seguridad.

Diferenciándose, fundamentalmente, en que mientras la UNE 21 185, en el sistema externo, considera como elementos captadores:

- Varillas o puntas captadoras.
- Conductores tendidos o líneas captadoras.
- Mallas de conductores o mallas captadoras.

La UNE 21 286 hace referencia exclusivamente a las puntas captadoras con dispositivo de cebado (PDC), que proporcionan un avance en el cebado  $\Delta t$  ( $\mu s$ ), aumentando su radio de protección respecto a los normales (PR).

Debido a estas características de

los PDC la norma UNE 21 186 contiene, en su anexo C (ensayo y evaluación de un PDC), el método a emplear para medir el avance de cebado, en laboratorios de alta tensión, por lo que estos dispositivos deben ir avalados por las certificaciones correspondientes del laboratorio acreditado que ha realizado la prueba conforme con el procedimiento indicado por la norma.

## 2. Riesgo

Con anterioridad al diseño y montaje de un SPCR, debe tenerse en cuenta el riesgo que tiene la estructura en estudio a ser impactada por el rayo y a partir de él estimar el nivel de protección a adoptar. La norma UNE 21 186, en su anexo B, recoge la guía para estimar este riesgo y el método de selección del nivel de protección, teniendo en cuenta parámetros tales como:

- Número de impactos de rayos en el terreno por año y  $km^2$  ( $N_g$ ). Este valor puede valorarse, si no se dispone de datos actualizados, a partir de expresiones en función de los niveles cerámicos ( $T_c$ , días al año en que se ha oído el trueno, al menos, una vez).

-  $N_d$  (frecuencia anual media de impactos directos de rayos esperada en una estructura).

Tabla I. Valores de  $N_g$

CEI 61024/1	$N_g = 0,04 T_d^{1,25}$	UNE 21 186	$N_g = 0,02 T_d^{1,67}$
Pierce	$N_g^2 = 0,03 T_d + 0,03^2 T_d^4$	Westhinghose	$N_g = 0,06 T_d^{1,5}$
Popolansky	$N_g = 14,71 T_d^{1,67}$ (Europa) $N_g = 14,71 T_d^{1,3}$ (Tierra)		

Valores de  $N_g$  UNE 21 186

$T_d$ / año	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$N_g/km^2$ , año	0,3	0,9	1,8	3	4,3	5,8	7,6	9,5	11,5

Tabla II

Situación relativa a la estructura	C1
Estructura situada en un espacio donde hay otras estructuras o árboles de la misma altura o más altos.	0,5
Estructura rodeada de estructuras más bajas.	0,75
Estructura aislada.	1
Estructura aislada situada sobre una colina o promontorio.	2

Tabla III. C2 Coeficiente de estructura

Tejado Estructura	Metal	Común	Inflamable
Metal	0.5	1	2
Común	1	1	2,5
Inflamable	2	2,5	3

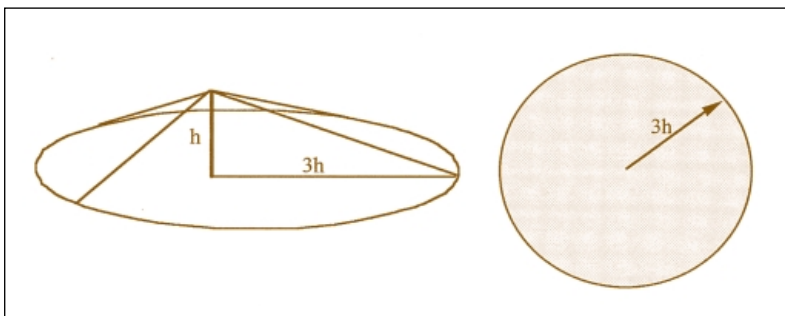


Fig. 1

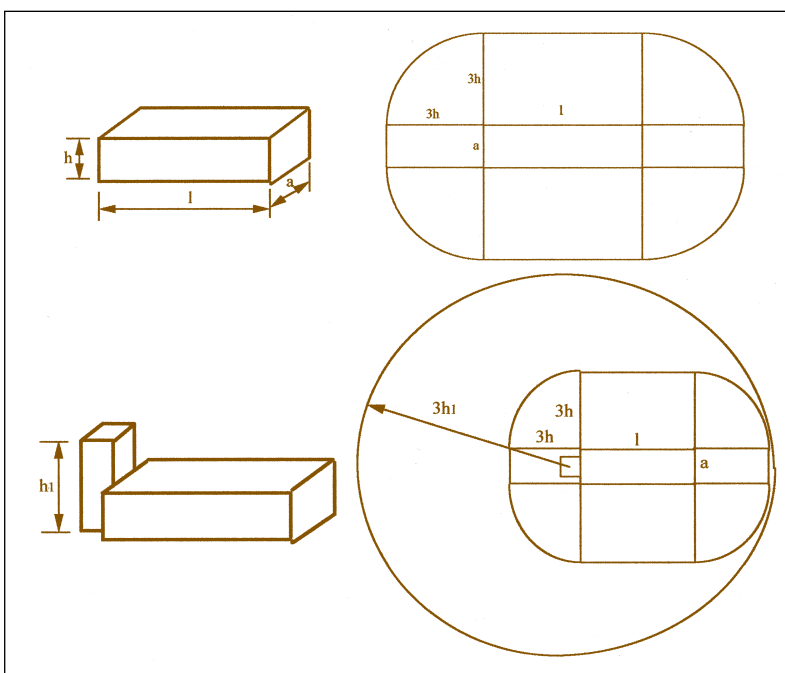


Fig. 2

El valor se estima por la expresión:

$$N_d = N_g \cdot 1,1 \cdot A_e \cdot C_1 \cdot 10^{-6} \quad (2.1)$$

1,1: Coeficiente de seguridad ligado a la evolución de los rayos.

$N_g$ : Número de impactos de rayos en el terreno al año y por  $km^2$ .

$A_e$ : Superficie de captación equivalente de la estructura aislada ( $m^2$ )

$C_1$ : Coeficiente relacionado con el entorno (Tabla II)

-  $A_e$  (Superficie de captación equivalente - Superficie sobre el suelo que tiene la misma probabilidad anual que la estructura de recibir el impacto directo del rayo).

- Superficies aisladas: Superficie comprendida entre las líneas obtenidas por la intersección entre la superficie del suelo y una línea pendiente 1:3 que pasa por el punto más alto de la estructura y de la vuelta a ésta (Fig. 1).

- Estructuras rectangulares: (Longitud  $l$ , ancho  $a$ , altura  $h$ ).

El valor está dado por la expresión:

$$A_e = a \cdot l + 6 h (l + a) + 9 \pi h^2 \quad (2.2)$$

-  $N_c$  (frecuencia anual media aceptable de rayos sobre una estructura). La valoración se hace teniendo en cuenta los conceptos que a continuación se indican por medio de los coeficientes  $C_i$  correspondientes a:

- Tipo de construcción. (C2) Tabla III.
  - Contenido de la estructura. (C3) Tabla IV.
  - Ocupación de la estructura. (C4) Tabla V.
  - Consecuencias sobre el entorno (C5) Tabla VI.
- mediante el coeficiente:

$$C = C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5 \quad (2.3)$$

expresándose el valor de  $N_c$

por la expresión:

$$N_c = 3 \cdot 10^{-3} / C \quad (2.4)$$

- Los efectos de los parámetros de rayo, tales como:

- Ópticos.
- Acústicos.
- Electroquímicos.
- Electrodinámicos.
- Radiación electromagnética.
- Térmicos.

### 3. Protección

En la etapa de diseño y montaje se han de tener en cuenta los sistemas externos e internos, conforme a la disposición de los elementos (Fig. 3); de manera que, a su vez, se minimicen los fenómenos de inducción por la cercanía entre las bajantes a tierra y las estructuras, que pueden dar lugar a la formación de bucles abiertos con estructuras tales como, tuberías de agua, calefacción central, alimentación eléctrica, etc., teniendo en cuenta que para la situación de los elementos captadores es preciso conocer la evolución de la descarga y manejar métodos tales como:

- Angulo de protección (a)
- Esfera rodante (distancia de cebado d(m))
- Mallado o retícula (dimensión de la malla) (Tabla VII).

Derivados de la teoría de los modelos electrogeométricos.

#### 3.1. Modelo electrogeométrico

Con el fin de estudiar el proceso de conexión entre las descargas atmosféricas y las estructuras en el suelo, en los años 50 se estableció un modelo matemático, llamado electrogeométrico, de aplicación a las descargas negativas descendentes, basado en la propagación del precursor negativo, representado por una línea cargada, con leyes varia-

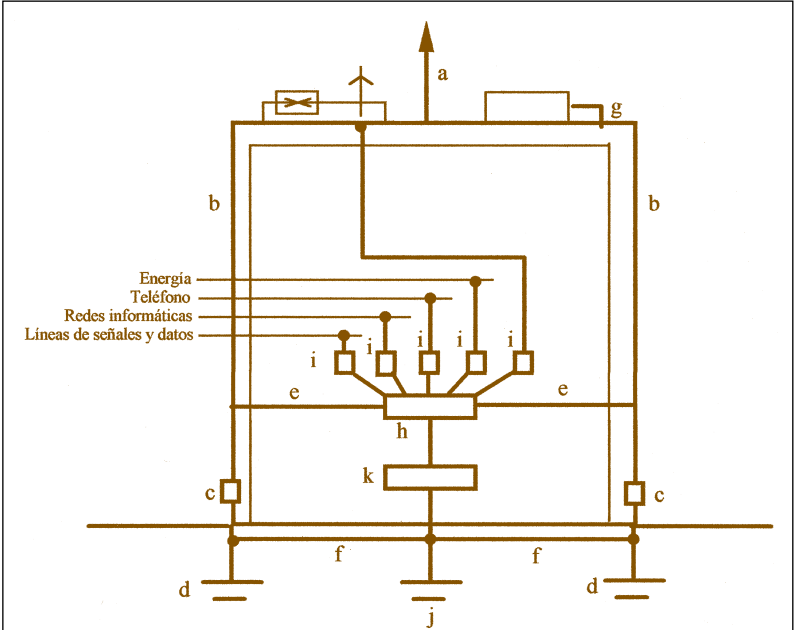
Fig. 3  
Instalación exterior - interior

Tabla IV. C<sub>3</sub> Contenido de la estructura

Sin valor o no inflamable	0,5
Valor común o normalmente inflamable	2
Gran valor o particularmente inflamable	5
Valor excepcional, irremplazable o muy inflamable, explosivo	10

Tabla V. C<sub>4</sub> Ocupación de la estructura

No ocupada.	0,5
Ocupada normalmente	3
De difícil evacuación o riesgo de pánico.	7



Instalación exterior	Instalación interior
a) PDC	f) conexiones equipotenciales
b) conductores de bajada	g) conductor de protección o de equipotencialidad
c) junta de control por conductor de bajada (manguito seccionador o puente de comprobación)	h) barras de equipotencialidad.
d) toma de tierra por conductor de bajada	i) protección contra sobretensiones
e) uniones equipotenciales entre tomas de tierra	j) puesta a tierra
	k) borne de tierra
	l) conexión directa o vías de chispas

Tabla VI. C<sub>5</sub> Consecuencias sobre el entorno

Sin necesidad de continuidad en el servicio y alguna consecuencia sobre el entorno	1
Necesidad de continuidad en el servicio y alguna consecuencia sobre el entorno	5
Consecuencias para el entorno.	10

Tabla VII. UNE 21 185 Tabla I. Colocación del dispositivo captador

Nivel de protección	d(m)	H(m)	20 α	30 α	45 α	60 α	Dimensión de las mallas (m)
I	20		25	*	*	*	5
II	30		35	25	*	*	10
III	45		45	35	25	*	10
IV	60		55	45	35	25	15

(\*) Se emplea la esfera rodante y la malla en estos casos.

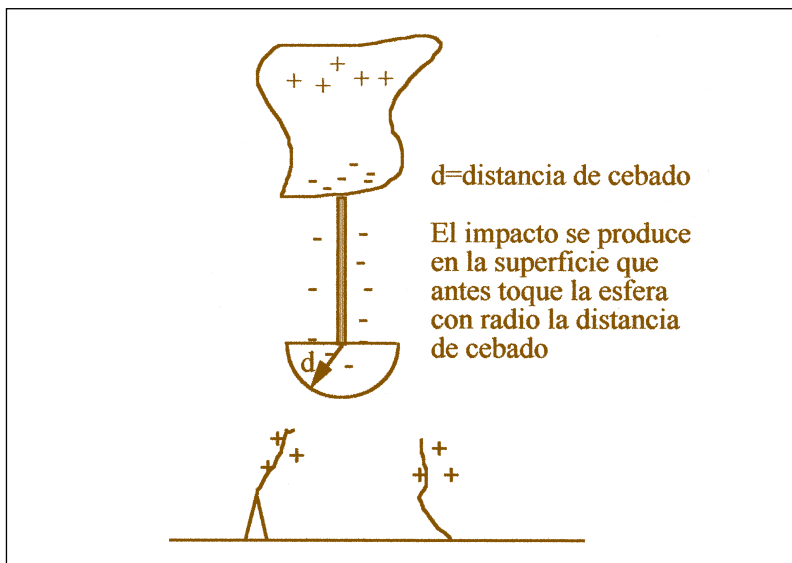


Fig. 4. Evolución de la descarga

bles según los diferentes autores (reparto uniforme, reparto uniforme con carga puntual en el extremo del precursor, reparto exponencial), que desciende en línea recta desde la nube al suelo, y en el campo eléctrico inducido en las estructuras situadas en la superficie del terreno, que al alcanzar el valor de cebado produce la descarga positiva, para finalmente producirse la unión de las dos, salvando una

distancia, tanto mayor cuanto mayor es la carga del precursor negativo, con conceptos tales como los expresados en la figura 4.

### 3.1.1. DISTANCIA DE CEBADO

Distancia máxima (d), medida desde la parte superior de una estructura o desde el terreno, que una descarga descendente, de carga Q, salva para unirse

con la descarga ascendente, cuyo origen está en la estructura o en el terreno, dando lugar a una descarga de intensidad I, debido a que el campo eléctrico en la superficie de la estructura o del terreno, bajo la acción de la descarga eléctrica descendente, alcanza un valor crítico, que produce el cebado de la capa de aire que separa a ambas descargas (descendente y ascendente) y que una carga descendente Q de 1C da lugar a una corriente de retorno 20 kA.

La distancia de cebado está relacionada con la intensidad cresta de la corriente de retorno por medio de la expresión, desarrollada por el grupo de trabajo 33.01 de CIGRE (Fig. 6).

$$d(m) = 10 I^{\frac{2}{3}} (kA) \quad (3.1)$$

### 3.1.2. ESFERA RODANTE

En base al concepto de distancia de cebado se aplica el método de la esfera rodante. Haciendo rodar una esfera, de radio el correspondiente a la distancia de cebado que se pretende estudiar, las descargas incidirán en aquellos puntos en que la esfera toca a la estructura o quedan exteriores y a más altura del volumen de la esfera de radio d.

Ya que la distancia de cebado depende de la intensidad de la descarga hay que considerar los casos en que la altura h de la estructura es superior o inferior a esta distancia d.

- $h > d$ , quedan zonas de la estructura sin proteger, ángulo a igual a cero.
- $h < d$ , la esfera toca a la superficie formando un ángulo a de protección, variable, por lo que es importante conocer, no solamente si hay muchos o pocos rayos en la zona, sino el valor de la corriente para la que se adopta la protección.

El ángulo de protección (α) se puede determinar de acuerdo con la expresión



$$\text{sen } \alpha = \frac{d - h}{d} = 1 - \frac{h}{d} \quad (3.2)$$

siendo tanto mayor el ángulo de protección, para una altura  $h$  de la estructura, cuanto mayor es la distancia de cebado ( $d$ ), y disminuyendo conforme la descarga es de menor intensidad, según puede verse en la Tabla VIII que corresponde a una estructura de 20 m. de altura.

La aplicación del método a una estructura compuesta y dotada de un pararrayos, permite observar las zonas susceptibles de ser impactadas y las zonas protegidas, así como establecer las puntas captadoras que pueden disponerse para la protección completa de la estructura, teniendo en cuenta que cuanto menor sea la descarga que se presente, menor será el radio de la esfera, aumentando el tamaño de la zona susceptible de ser impactada, siendo de considerar los impactos laterales que se pueden producir en los pararrayos verticales (Fig. 8).

Aunque las líneas de transporte de energía están fuera del alcance de las normas, no lo están los principios de los modelos electrogeométricos, por lo que una aplicación de los mismos al Reglamento de Líneas Aéreas de Alta Tensión en su art. 9 (cables de tierra), que indica que cuando se empleen cables de tierra

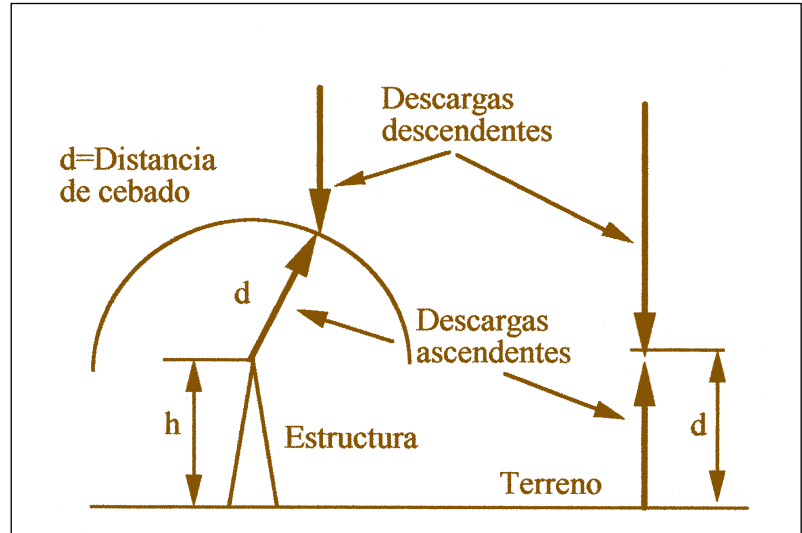


Fig. 5.  
Distancia de cebado

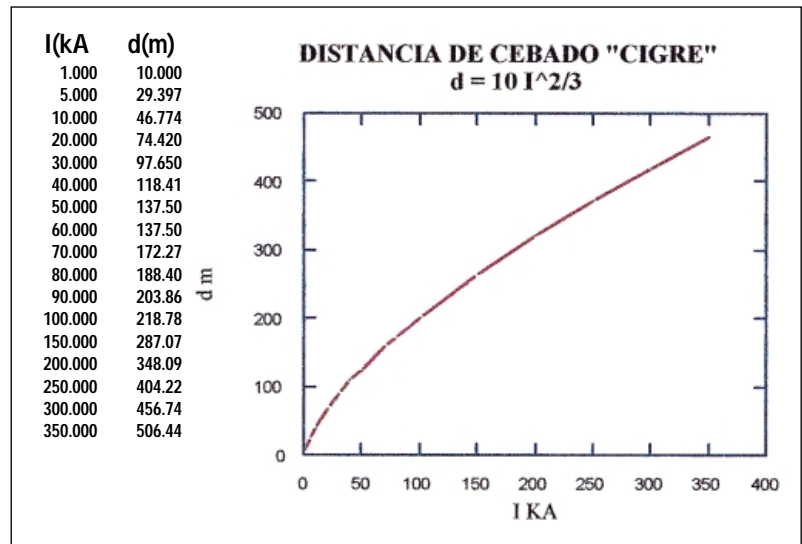


Fig. 6.

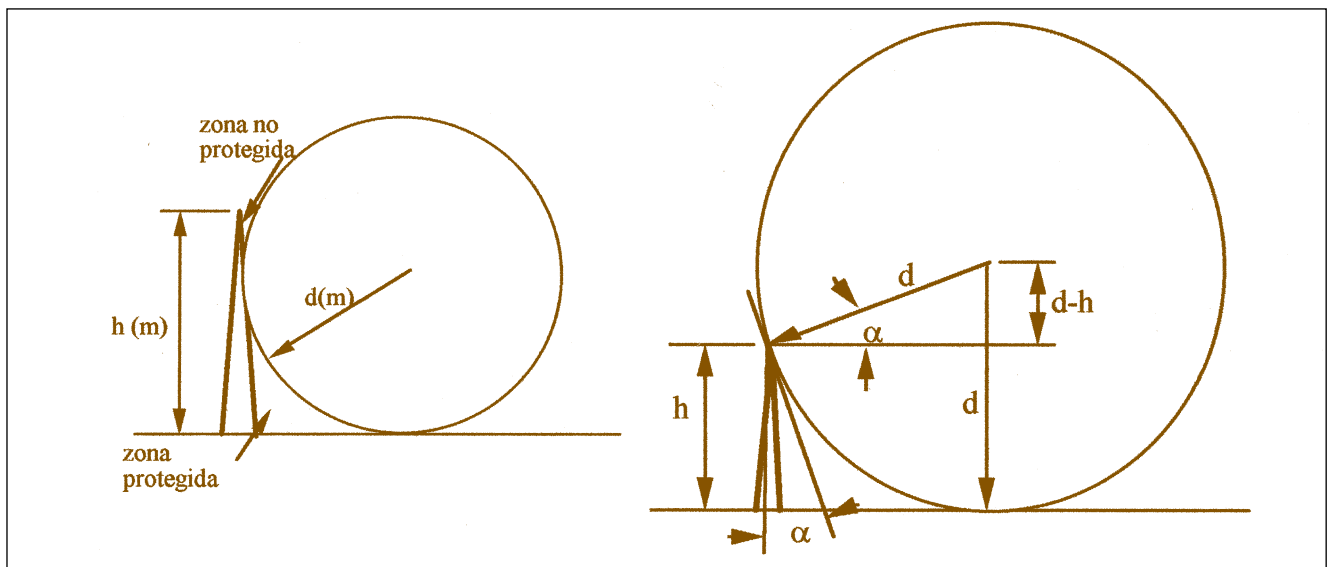


Fig. 7.  
Ángulos de protección

Tabla VIII.

h(m)	d(m)	I(kA)	$\alpha$
20	10	1	-
20	29,397	5	18,64
20	46,774	10	34,92
20	74,42	20	46,86
20	97,65	30	52,67

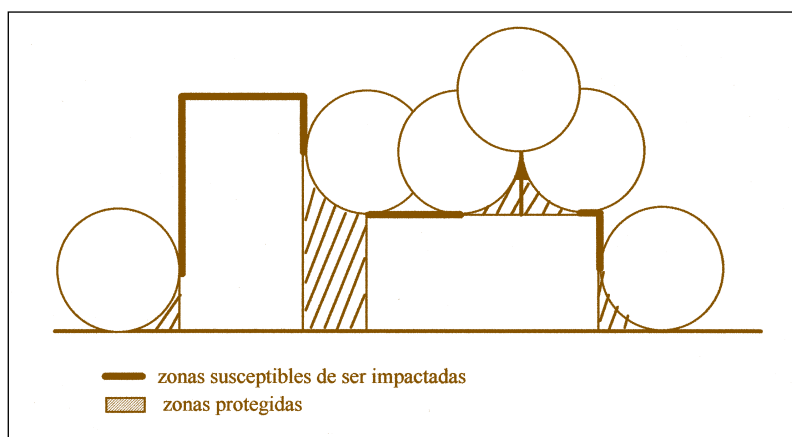


Fig. 8.  
Esfera rodante

Tabla IX.

H(m)	d(m)	I(kA)
15	35,175	6,5971
20	46,9	10,157
25	58,625	14,195
30	70,35	18,659
35	82,075	23,513

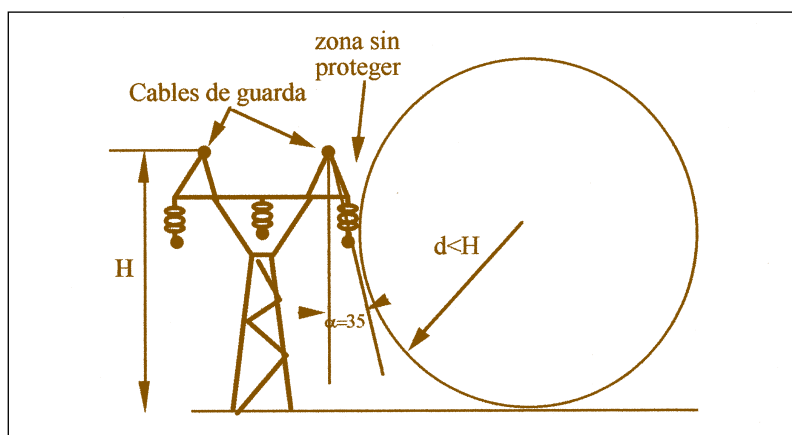


Fig. 9.  
Esfera rodante

para la protección de la línea, se recomienda que el ángulo que forma la vertical que pasa por el punto de fijación del cable de tierra con la línea determinada por el punto y el conductor, no exceda de  $35^\circ$ , nos indica que, de acuerdo con la expresión:

$$\text{sen}\alpha = \frac{d - H}{d} = 1 - \frac{H}{d} \quad \alpha = 35 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 0,574 = 1 - \frac{H}{d} \quad (3.3)$$

$$d = 2,345H$$

una torre de transporte de 30 m de altura, estaría protegida para descargas iguales o superiores a 18,659 kA, siendo necesario disminuir el ángulo de protección si en la zona las descargas son inferiores (5 - 10 kA) (Tabla IX, Fig. 9).

#### 4. Conclusiones

- Disponer de un sistema de protección contra rayos no garantiza la protección absoluta de personas, estructuras u objetos; pero la aplicación de normas reduce de forma significativa el riesgo de los daños producidos.
- A la hora de adoptar un sistema de protección contra el rayo es necesario calcular el riesgo de la estructura.
- Los modelos electrogeométricos son herramientas útiles para determinar la protección contra rayos de las estructuras, siendo importante conocer las intensidades de la zona donde han de colocarse las protecciones.

#### 5. Bibliografía

[1] "Lightning protection code". ANSL/NFPA 78 (National Fire Protection Association).  
 [2] Bonamy A. y Ott, R. "La protection des installations au sol contre les effets de la foudre". EDF - DER, 1994, HM-25/94/013/A, (1994).

- 
- [3] Dellera, L. y Garbagnati, E. "Lightning stroke simulation by means of the leader progression model. Part 2: Exposure and shielding failure evaluation of overhead lines with assesment of applications graphs". IEEE Trans. on Power Delivery, vol.5, pág. 2023, octubre (1990).
- [4] Eriksson A.J. "The incidence of lightning strikes to power lines". IEEE Trans. on Power Delivery, nº3, pág. 859, julio (1987).
- [5] Eriksson A.J. "An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis", IEEE Trans. on Power Delivery, vol PWRD-2, nº3, pág. 871, julio (1987).
- [6] Gary, C. La foudre. Mécanisme d'impact et fonctionnement des paratonnerres. La Meteorologie VI, nº2 pág. 35 (1975).
- [7] Gigré. Task Force 33.01.03. Lightning Exposure of Structures and Interception Efficiency of Terminals, octubre (1997).
- [8] Golde, R.H., Lightning, Academic Press, (1977).
- [9] Golde, R.H. Lightning protection. Academic Press, London, ISBN:0-12-287802-7 (1981).
- [10] Hasse, P. "Protección contra sobretensiones de instalaciones de baja tensión". Paraninfo, ISBN: 84-283-1829-8 (1991).
- [11] Hermoso, B. y Martínez Cid, P.M. "Protección contra el rayo de Redes Eléctricas de Media y Baja Tensión. Sobretensiones Eléctricas". Iberdrola, Universidad Pública de Navarra. noviembre (1996).
- [12] Hermoso, B. y Martínez Cid, P.Mª. "Riesgo por impacto de rayos en las instalaciones eléctricas". Montajes e Instalaciones, pág.115-119, julio/agosto (1998).
- [13] Krider, E.P. "Physics of lightning today". Congrès Foudre et Montagne, Chamonix, Conference pág.127-132, junio (1994).
- [14] Uman, M.A. The lightning discharge. Academic Press, London (1987).
- [15] UNE 21-2185. Protección de las estructuras contra el rayo y principios generales. AENOR (1995).
- [16] UNE 21-2186. Protección de estructuras, edificaciones y zonas abiertas mediante pararrayos con dispositivo de cebado. AENOR (1996).

