

Trabajo Técnico

Título:

La seguridad eléctrica de los Sistemas de Protección de Rayos (SPCR), en los países asociados al Mercosur

Autores:

Juan Carlos Arcioni - Ing. Electricista (UBA)

Jorge Francisco Gimenez - Ing. Electrónico (UTN)

Seudónimo de identificación: "Martín Fierro"

Mail: [jgimenez@citefa.gov.ar](mailto:jgimenez@citefa.gov.ar)

Tel: 4687-7723 // 4709-8156

Tema:

3.4 Seguridad Eléctrica - Área tecnológica - Normas y criterios nacionales en la materia

Abstract:

En este trabajo presentamos una estimación A PRIORI de las áreas equivalentes de captura de rayos tanto en estructuras civiles y de SPCR (Sistema de protección contra rayos) según normas IEC, IRAM, NBR, BS, etc. y la bibliografía internacional reconocida en el tema.

---

## Capítulo 1 - Introducción

En los apartados a), b) y c) de este capítulo, los autores quieren recordar algunas definiciones que pueden servir a los amables lectores para recapitular, o bien repasar, ciertos conceptos necesarios para comprender este trabajo.

a) La actividad eléctrica atmosférica (“cerámica”): En el CUADRO 1 presentamos las definiciones de cuatro términos básicos del estudio de la Actividad Eléctrica Atmosférica (“cerámica”) con sus símbolos literales y sus unidades de medida. Estos términos se emplearán en el texto de este trabajo.

En el Anexo A recopilamos algunos “conceptos sobre rayos a tierra” que nos parecen indispensables.

b) La frecuencia esperada de rayos directos en una estructura (Nd)

La frecuencia anual promedio de Nd de rayos directos en una estructura, se puede evaluar aplicando la fórmula siguiente:

$$Nd = Ka \cdot Ng \cdot Ae \cdot 10^{-6} \text{ [rayos directos/año]} \quad [1]$$

siendo:

Ka: un coeficiente adimensional con el que se evalúa numericamente a la influencia que tiene la situación relativa de la estructura de altura H con respecto a otras estructuras que la rodean en la probable incidencia de rayos que puedan impactar sobre la estructura considerada. Al coeficiente Ka se lo designa “coeficiente ambiental”. Puede valer  $Ka = 1$  según las normas IEC y BS.

También puede valer  $Ka \neq 1$  según otras normas (Ver el Anexo E de la IRAM 2184-1-1)

Ng: la densidad anual promedio de rayos a tierra, en rayos por kilómetro cuadrado y por año, propia de la región donde está localizada la estructura.

Ae: el área colectora equivalente de una estructura ( $m^2$ )

c) El área colectora equivalente (Ae) de una estructura.

Se entiende por área colectora equivalente de la estructura a un área de la superficie del suelo donde está construida y que tiene la misma frecuencia anual de rayos directos (Nd) que atribuimos que pueda tener la estructura (según las hipótesis del MODELO ELECTROGEOMÉTRICO y PROBABILÍSTICO que se ADOPTA para describir los fenómenos electrofísicos de “caída de rayos” (negativos/descendentes) que pudieran AFECTAR a la estructura en un año que se considere.

---

## **Capítulo 2 - Cálculo del área de exposición (área de “captura” de rayos) equivalente de una estructura (Ae)**

El área Ae es un área del plano de tierra (suelos) de la estructura prolongada en todas las direcciones de manera de tener en cuenta su altura. Los límites del área Ae están separados del perímetro de la estructura por una distancia Xc de la estructura en cada uno de los puntos del perímetro.

La distancia Xc es proporcional a la altura H. Sus valores se han fijado en las normas IEC, IRAM, BS, NBR, etc. Por ejemplo: para una estructura rectangular simple (“paralelepípedo”) de largo L, ancho W y altura H, el área Ae sobre el plano de tierra de la estructura tiene un largo  $L + 2Xc$ , un ancho  $W + 2Xc$ , con cuatro cantos redondeados formados por segmentos de un círculo de radio Xc. Entonces, según la fig. 1:

para  $(Xc/H) = 1$  resulta el área  $Ae = LW + (L+W) \cdot 2 H + \pi H^2$  (Fig. 1, izquierda)  
y para  $(Xc/H) = 3$  sale el área  $Ae = LW + (L+W) \cdot 6 H + 9 \pi H^2$  (Fig. 1, derecha)

Nota: Para considerar numericamente a la influencia del MEDIO AMBIENTE que rodea a la estructura en estudio de altura H se deben estudiar las otras estructuras que disten de H o de 3H (según cada norma adoptada) con respecto a la estructura en estudio. Un método se expone en 4.2 de la norma IRAM 2184-1-1.

En todos los casos, se supondrá un valor mínimo del área colectora equivalente igual a la proyección horizontal de la estructura, en sí, contra el plano de tierra donde está situada esa estructura.

### Capítulo 3 - Área colectora de rayos equivalente $A_e$ de una Punta Franklin OA

En este caso particular, definimos que  $X_c$  es la distancia radial medida desde el punto de contacto de una imaginaria esfera “rodante” (o “ficticia”) con el plano de tierra hasta la base O de la punta Franklin OA. (PF OA) tal como lo estudiamos en el capítulo 6.

En la Figura 2 hemos representado al área colectora de rayos negativos descendentes y el “volumen protegido” por la PF OA.

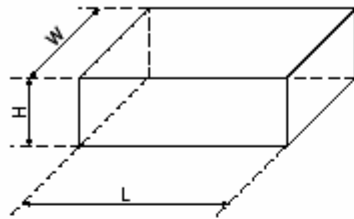
Podemos apreciar en la Figura 18 que el “cuerpo espacial geométrico euclidiano” correspondiente al “espacio protegido por la PF OA”, según el método de la imaginaria “esfera rodante” (o “ficticia”), es el VOLUMEN de un CONOIDE de altura recta H y superficies laterales curvas que están generadas por la revolución del arco  $AB_0 \approx AB'_0$  de una circunferencia de radio  $R_s$ , alrededor del eje vertical OA. El conoide tiene una BASE circular de radio  $X_c = f(R_s)$ , siendo  $X_c$  y  $R_s$ , dos parámetros del MODELO ELECTROGEOMÉTRICO de la esfera ideal (imaginaria) llama “Esfera” rodante o ficticia, tal como los describimos en nuestro capítulo 4.

Cuadro 1: La actividad eléctrica atmosférica (“ceraúnic”) : Algunas definiciones básicas con sus símbolos y unidades (según el anexo B de la norma IRAM 2184-1-1)

Item	Definición	Símbolo	Unidad
1	<b>Tormenta eléctrica:</b> Tempestad que se caracteriza por la presencia audible y/o visible de relámpagos (rayos entre nubes), rayos a tierra, centellas (rayos globulares) y otros fenómenos eléctricos atmosféricos (por ejemplo, el “fuego” de San Telmo)	-	-
2	<b>Nivel ceraúnic:</b> Es el número promedio anual de días con tormentas eléctricas ( $T_d$ [días/año]) (“thunderstorm days per year or annum”) de un lugar geográfico de la superficie terrestre (o del mar) (por ejemplo: una estación meteorológica)	$T_d$	(días/año)* *con tormentas eléctricas
3	<b>Curvas de niveles isoceraúnicos:</b> Curvas que unen puntos de igual nivel ceraúnic de una cierta zona geográfica, durante un período climatológico determinado (por ejemplo: diez años, según el SMN (Servicio Meteorológico Nacional de la Argentina)	-	-
4	<b>Densidad ceraúnic:</b> Es el número promedio anual de rayos a tierra (o impactos de rayos) “caídos” en el área de 1 km <sup>2</sup> de un cierto lugar geográfico (por ejemplo: una estación meteorológica). Se indica con el símbolo $N_g$ [rayos a tierra/(km <sup>2</sup> .año)] (del inglés: “number of flashes to ground (earth) per square kilometre per year (or annum)”). Se estudia generalmente durante un período climatológico determinado (por ejemplo: un decenio).	$N_g$	$\left[ \frac{\text{rayos a tierra}}{\text{km}^2 \cdot \text{año}} \right]$

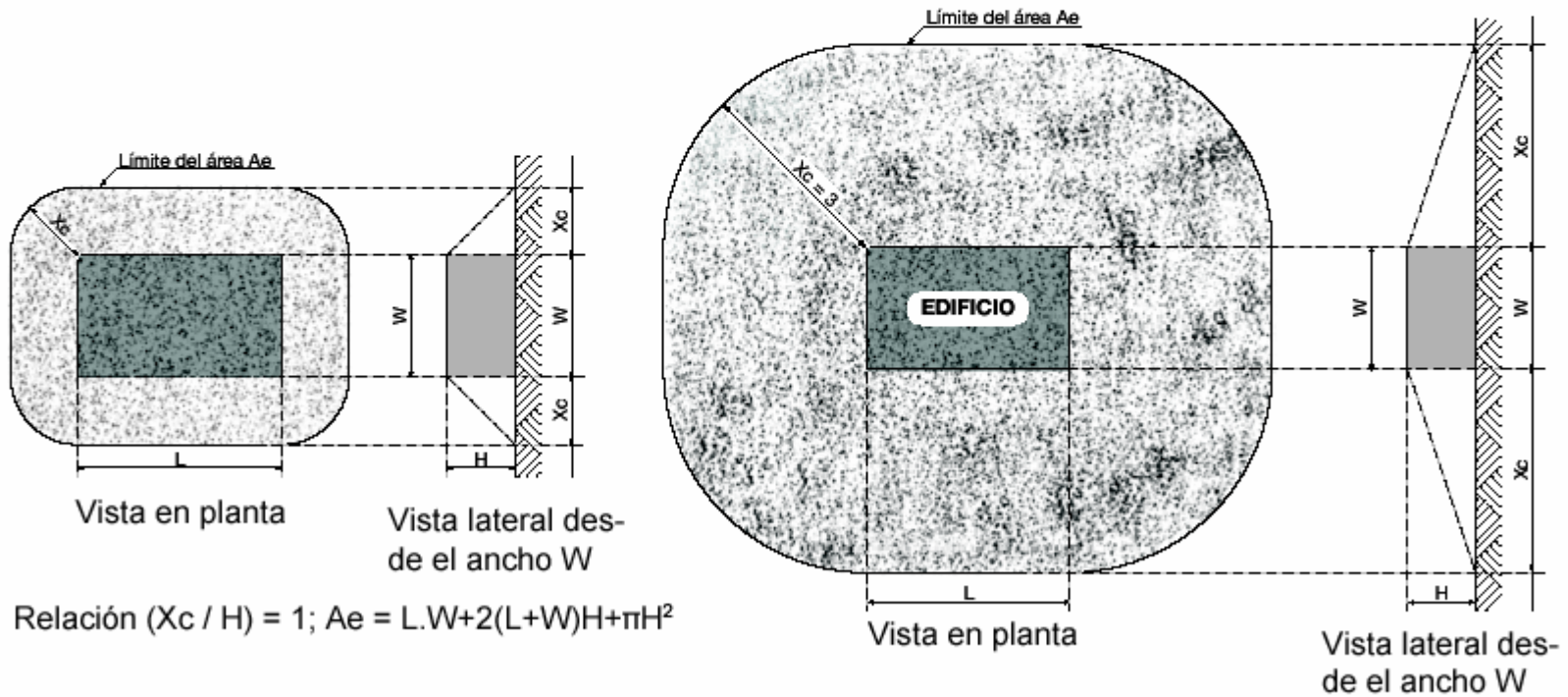
Fuente bibliográfica: Norma IRAM 2184-1-1: 1997 (primera edición) (Está en estudio desde el 2005 la segunda edición).

Fig. 1 - Áreas colectoras equivalentes  $A_e$  de un edificio de paredes rectangulares (paralelepípedo) para las relaciones  $(X_c / H) = 1$  y  $(X_c / H) = 3$



Perspectiva del edificio de medidas:  
 $L \times W \times H$

Medidas del edificio  $\left\{ \begin{array}{l} L = \text{Largo} \\ W = \text{Ancho} \\ H = \text{Altura} \end{array} \right.$



Relación  $(X_c / H) = 1$ ;  $A_e = L.W + 2(L+W)H + \pi H^2$

Relación  $(X_c / H) = 3$ ;  $A_e = L.W + 6(L+W)H + 9\pi H^2$

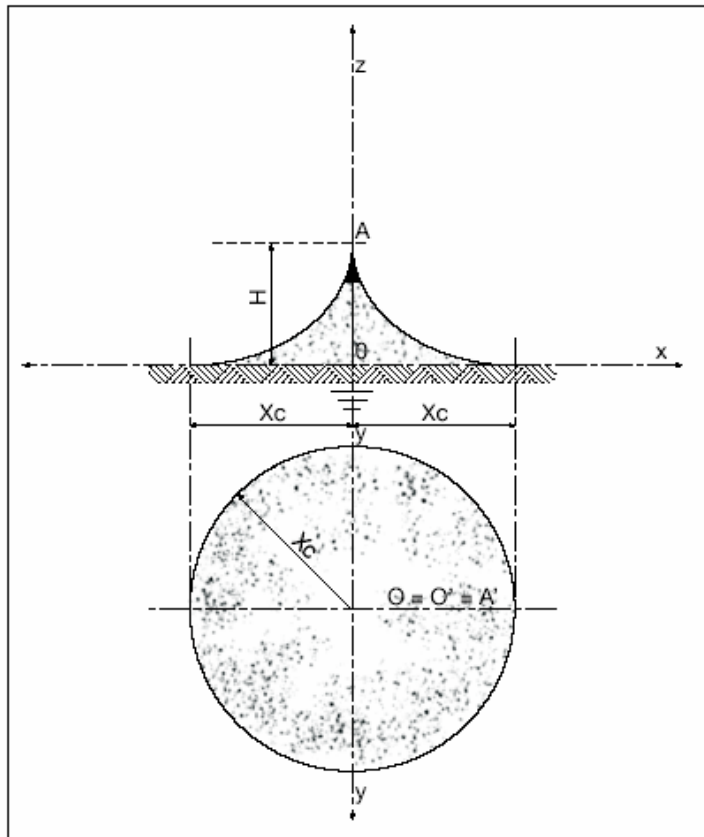
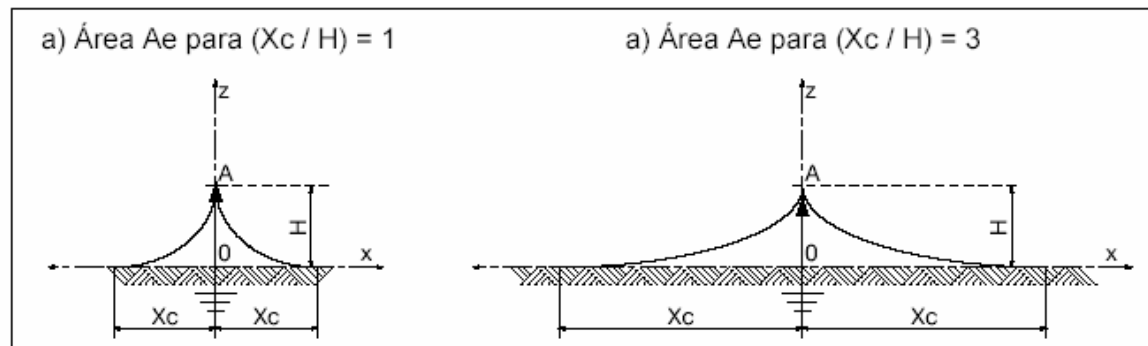


Fig. 2 - Área colectora de rayos (negativos descendentes "cortos") equivalente de la PF OA. El área colectora:  $A_e = \pi X_c^2$  es la del círculo de radio  $X_c$  y centro  $O = O' = A'$

Figura 3 - Áreas colectoras de rayos (negativos, descendentes "cortos")  $A_e$  de la Punta Franklin PF "OA" ("solitarias", separada electricamente de otras estructuras "cercanas" puestas a tierra), para los casos siguientes: a) Área  $A_e$  para  $(X_c / H) = 1$  y b) Área  $A_e$  para  $(X_c / H) = 3$



---

## Capítulo 4 - Modelo electrogeométrico de protección contra rayos negativos descendentes

**Nota:** Esta descripción es válida solamente en el caso de rayos descendentes negativos, que es el único caso en que se aplica el modelo electrogeométrico. Este tipo de rayo es el más frecuente (véase la norma IRAM 2184-1-1).

### 4.1) Descripción de la fase de aproximación del rayo a la tierra

#### 4.1.1) Determinación del punto de impacto de un rayo negativo descendente.

La formación o la llegada de una nube de tormenta provoca la creación de un campo eléctrico (ambiente) entre la nube y el suelo. Este campo eléctrico puede superar en el suelo, los 5 kV/m, iniciando así la creación de “descargas corona” a partir de las irregularidades del suelo o de las masas metálicas.

El rayo comienza por la formación, en el seno de la nube tormentosa, de un **trazador descendente (nube-suelo)** que se propaga por “pasos” hacia el suelo.

El **trazador descendente** transporta cargas eléctricas, provocando el incremento del campo eléctrico en el suelo.

Un **trazador ascendente** se desarrolla a partir de una estructura o de un objeto que sobresale del suelo. Se propaga hasta que encuentra el trazador descendente y la corriente del rayo fluye por el canal así creado por la unión eléctrica de ambos trazadores (el descendente y el ascendente). Otros trazadores ascendentes pueden ser emitidos desde diferentes estructuras sobre el suelo. El primero de entre ellos que se encuentre con el trazador descendente determina el punto de impacto del rayo (Figura 5).

#### 4.1.2) Velocidad de propagación de los trazadores ascendentes y descendentes

Datos experimentales recientes provenientes de la naturaleza, muestran que las velocidades medias de los trazadores ascendente y descendente son comparables durante la fase de aproximación entre ellos. La relación de las velocidades  $v_a/v_d$  es aproximadamente 1 (entre 0,9 y 1.1).

Aquí supondremos que  $v \equiv v_a \equiv v_d \equiv 1 \text{ m}/\mu\text{s}$  (valor medio de las velocidades de los trazadores), siendo:

$v_a$ : velocidad del trazador ascendente

$v_d$ : velocidad del trazador descendente

$v$ : velocidad común a ambos trazadores

---

## 4.2) Modelo electrogeométrico de protección contra rayos negativos descendentes

### 4.2.1) Radio de protección de un pararrayos Franklin (sin dispositivo(s) de cebado)

En el caso de un pararrayos Franklin, según el modelo electrogeométrico, el punto de impacto del rayo viene determinado por el objeto sobre el suelo que primero se encuentre a la distancia  $D_s$  del trazador descendente, incluso si este objeto es el propio suelo llano. La distancia  $D_s$  que determina el punto de encuentro de los trazadores descendente y ascendente, se denomina “distancia de cebado”: es también la longitud de desarrollo del trazador ascendente hacia ese punto de encuentro.

Por lo tanto: todo sucede como si el extremo del trazador descendente estuviese rodeado de una esfera ficticia, de radio  $D_s$ , centrada sobre ese extremo  $Co$ , y como si esta esfera acompañase rígidamente al extremo del trazador descendente (Ver la Figura 6).

En el caso de un pararrayos Franklin de altura “H” con respecto a la superficie de referencia (techo del edificio, suelo...) existen tres posibilidades (ver Figura 6):

- si la esfera entra en contacto únicamente con la punta vertical ( $A'$ ), que será el punto de impacto de la descarga atmosférica (rayo),
- si la esfera entra en contacto con la superficie de referencia sin tocar la punta, el rayo tocará únicamente el suelo en  $S$ ,
- si la esfera entra en contacto simultáneamente con el pararrayos Franklin y la superficie de referencia (fig. 6), hay dos puntos de impacto posibles:  $A'$  y  $Bo'$ , pero el impacto jamás podrá producirse dentro de la zona sombreada (ver figura 6). Esta es una HIPOTESIS de nuestro modelo electrogeométrico.

La distancia de cebado  $D_s$  (en metros) viene, generalmente, dada por la ecuación siguiente:

$$D_s = 10 \cdot \hat{I}_p^{2/3}$$

siendo:

$\hat{I}_p$  el valor de cresta presunto de la corriente del primer arco de retorno tierra-nube (kA)

### 4.3) Radio de protección $R^*_p$ de un pararrayos FRANKLIN

De la Fig. 7 se deduce que:

$$R^*_p = \sqrt{2_s DH - H^2}$$

Según las normas IRAM 2184-1 e IRAM 2184-1-1 (ediciones del año 2000 y siguientes) debe ser  $D_s \geq H$ .

Es decir que  $R^*_p \geq 0$  siempre que sea  $D_s \geq H$ , lo que significa que NINGÚN pararrayos protege de los rayos que “caigan” dentro de su radio de protección y tengan valores de cresta presuntos de sus corrientes  $\hat{I}_p$  que sean menores que  $\hat{I}_c$  siendo  $\hat{I}_c \leq (h / 10)^{3/2}$ . Esta corriente  $\hat{I}_c$  es un valor crítico.

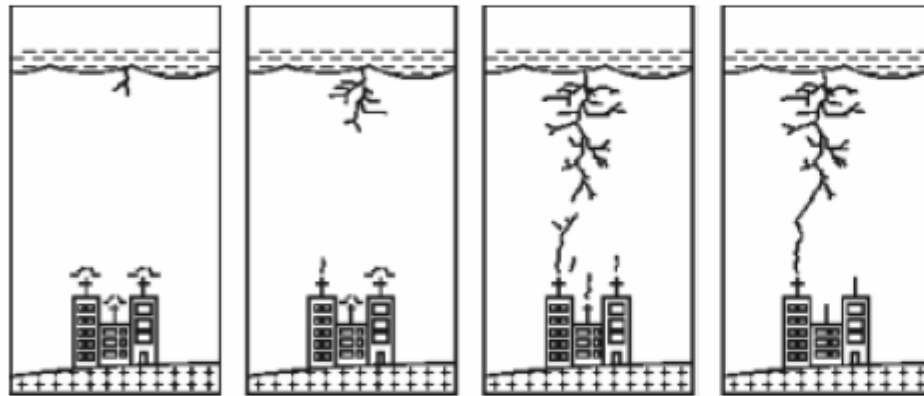


Figura 5 - Determinación del punto de impacto de un rayo negativo descendente (nube-suelo).

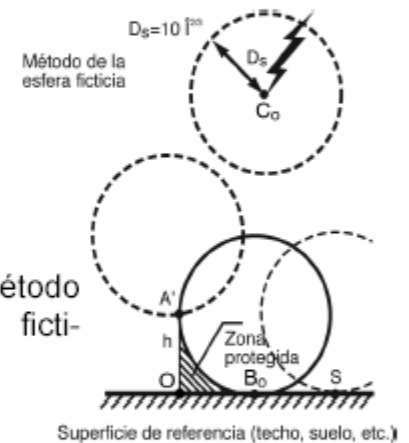
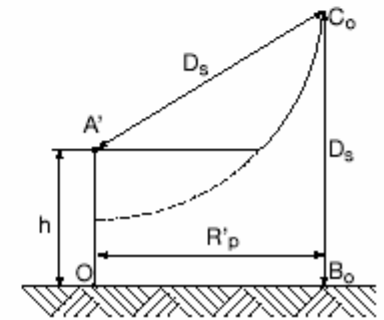


Figura 6 - Método de la esfera ficticia.

Figura 7 - Radio de protección contra rayos de un pararrayos Franklin (PF)



### Capítulo 5 - Trazadores descendentes y ascendentes. Proceso de interconexión. Modelo electrogeométrico del M.E.R. (Método de la esfera rodante)

En la figura 8 se muestra la equivalencia aproximada entre el sistema de cargas nube-tierra y un capacitor plano ideal. Se pueden observar las líneas de potencial deformadas por la presencia de los objetos terrestres, lo que provoca la intensificación del campo eléctrico.

Un "líder" de pasos o descarga guía escalonada o trazador descendente (fig. 9) se ha originado en la parte de la carga negativa de la nube. En la fig. 10 se muestran los dos tipos de trazadores que se producen en el proceso de descarga de un rayo a tierra. Los trazadores ascendentes libran una especie de "competencia" por el trazador descendente. En la fig. 11 se ha producido la conexión. En el modelo electrogeométrico a la distancia OP (Fig. 12) se la denomina **distancia de impacto**. La distancia de impacto  $D_s$  se define como la distancia entre el objeto que será impactado y la punta del trazador de pasos, en el instante que se inicia la "interconexión" con el trazador ascendente.

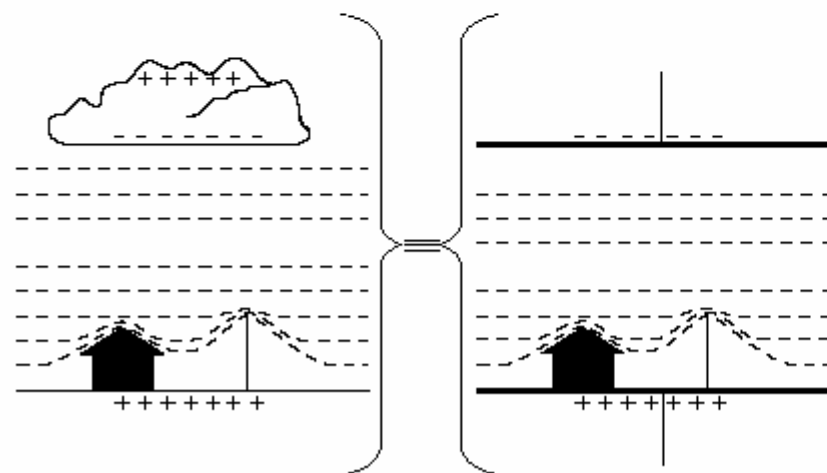


Figura 8 - Intensificación del campo eléctrico por los cuerpos terrestres. Analogía nube-tierra con un gran capacitor plano.

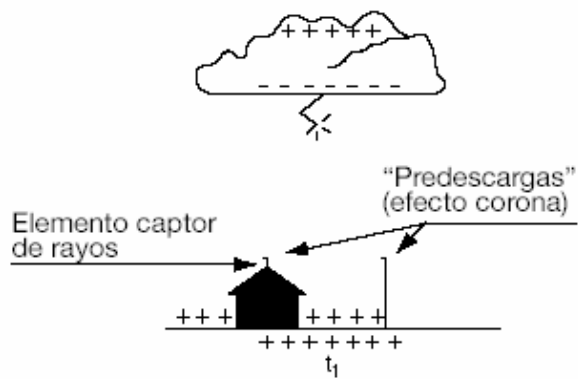


Figura 9 - Iniciación del trazador descendente (trazador de pasos).

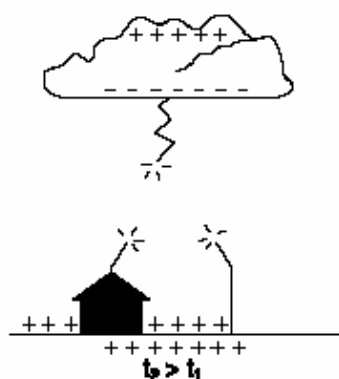


Figura 10 - "Competición" de trazadores ascendentes

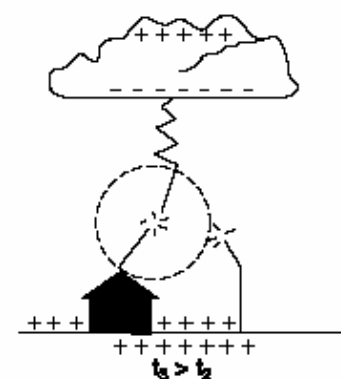


Figura 11 - "Interconexión" entre trazadores descendente y ascendente

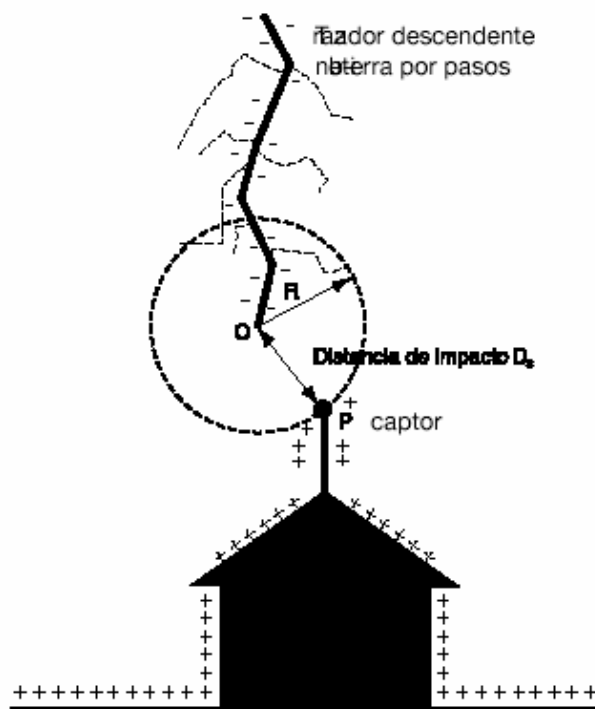


Figura 12 - Distancia de impacto  
 $D_s = R = 10 (I_p)^{2/3}$

## Capítulo 6 - Determinación del área colectora equivalente de una punta Franklin OA “aislada” de otras estructuras puestas a tierra. Aplicación del método de “la esfera rodante”

6.1) **Introducción:** En la Figura 13 vemos la punta OA y la esfera E (Co; Rs) en un plano diametral y en planta. La ecuación [1] de la distancia radial Xc del centro Co de la esfera E (Co; Rs) de radio Rs sobre el plano de tierra (xOy) es:

$$\left(\frac{X_c}{H}\right) = \sqrt{2 (R/H) - 1}$$

La distancia radial Xc es el ALCANCE de “captura” de rayos de corrientes presuntas Ip por la PF OA. De la [1] hallamos la función (a) siguiente:

$$\left(\frac{R_s}{H}\right) = \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{X_c}{H}\right)^2 + 1 \right]$$

siendo: H = OA = altura de la PF y Rs = radio de la esfera rodante que es función de Ip. El radio Rs = Ds = distancia de “atracción de rayos” está dado por la función (b) siguiente:

$$D_s = a I_p^b \quad (\text{m}; \text{kA}_c) \quad (\text{b})$$

en donde Ip = corriente presunta del rayo que “atrae” la PF “OA” (Valor de cresta). Reemplazando Rs = Ds de la (b) en la (a), resultan las ecuaciones siguientes.

$$\frac{a I_p^b}{H} = \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{X_c}{H}\right)^2 + 1 \right]$$

$$I_p = \left[ \frac{H}{2a} \left[ \left(\frac{X_c}{H}\right)^2 + 1 \right]^{1/b} \right] \quad (\text{c})$$

Adoptamos la siguiente ecuación (d) según la IEC 62305-1/2006, representada en la figura 14:

$$R_s = D_s = 10 (I_p)^{2/3} \quad (m; kA_c) \quad (d)$$

Así resultan los valores:

$$\left[ \begin{array}{l} a = 10 \\ b = \frac{2}{3} \end{array} \right]$$

que reemplazamos en la función (c) y así se obtiene la función explícita (e) siguiente:

$$I_p = \left[ \frac{H}{20} \left[ \left( \frac{X_c}{H} \right)^2 + 1 \right] \right]^{3/2} \quad (e)$$

En la figura 3 a la izquierda representamos la función:

$$I_p = f \left[ H; \left( \frac{X_c}{H} \right) \right]$$

para los valores  $\left( \frac{X_c}{H} \right) = 1, 2 \text{ y } 3$  tomados como parámetros prefijados

En la figura 15 a la derecha, representamos la distribución probabilística log-normal:

$$I_p = F (\text{probabilidad } \%)$$

en donde la "probabilidad %" es la probabilidad de que haya una corriente  $I$  que sea mayor o igual que  $I_p$ , es decir:  $I \geq I_p$ .

En la figura 15 a la derecha, se representa la función  $G(I_p)$  pero girada  $270^\circ$ , es decir:

$$\text{Probabilidad } \% = \text{Prb} (I \geq I_p) = G(I_p)$$

NOTA: Esta función  $\text{Prb} (I \geq I_p) = G(I_p)$  es la representada por las líneas "1A + 1B" de la figura A5 del esquema A de IRAM 2184-1-1 (junio 2005) y corresponde al primer rayo negativo descendente "corto" (duración < 2 ms) Ver el anexo A.

## 6.2) Análisis probabilístico:

En la figura 16 hemos representado nuestro NOMOGRAMA correspondiente a la expresión de la figura 3 siguiente:

$$f(H; (x_c/H)) = I_p; I_p = g(\text{Probabilidad \%})$$

que hemos aplicado a los casos de las estructuras CIVILES, “aisladas”, “solitarias”, en un CAMPO ABIERTO, que contemplan las normas IEC 61024-1-1 (IRAM 2184-1 y 2184-1-1) y la nueva serie IEC 62305:2006.

Hemos considerado en caso de la Punta Franklin OA de la figura 13. Así obtenemos la figura 17 con las distribuciones de probabilidades de atracción de rayos negativos descendentes “cortos” de corrientes  $I$  para la PF “OA” de altura  $H$  [m], aislada en campo libre, siendo la curva ① para la relación  $(X_c/H)$ , la ② para  $(X_c/H)=2$  y la ③ para  $(X_c/H)=3$ .

Notamos que las curvas ①, ② y ③ son funciones logaritmo-normales cuyos parámetros (el promedio  $H$  (50%) y la dispersión logarítmica decimal [ $\sigma$  (log  $H$ ))] están tabulados en la tabla 1.

En símbolos; tenemos las funciones probabilísticas  $P\%$  de las corrientes  $I$  “atraídas” por la PF “OA” según las funciones siguientes:

$$P \% = \text{Prb} (I \geq I_p) = F [H; (x_c/H)]$$

## 6.3) Area colectora equivalente a la PF “OA”

Es la del círculo de radio  $X_c$  y centro  $O \equiv O' \equiv A'$  que representamos en la figura 18.

El área  $A_e$  colectora (de rayos a tierra) equivalente de una estructura es un AREA de la superficie del suelo (o de otro plano horizontal paralelo al suelo) que tiene la misma frecuencia anual de rayos directos que “caen” sobre la estructura. Es decir: sobre el área  $A_e$  “caen” tantos rayos, en un año, como en la estructura. Una PF tiene una  $A_e$  en el sentido de que la PF “captura” como pararrayos durante un año un número de rayos igual al que caerían sobre  $A_e$ . El volumen teórico protegido contra rayos por la PF OA es el volumen del “CONOIDE” de eje y altura OA, base de área  $A_e$  y superficies laterales de revolución del arco circular  $AB_0$  alrededor del eje OA (ver la figura 18)

---

#### 6.4) Probabilidades de atracción de rayos negativos descendentes RND, alturas H de la PF y relaciones ( $X_c/H$ )

En la tabla 2 reunimos los intervalos de probabilidades: a) del 99,9% al 80% y b) del 80% al 5%) que obtenemos de la figura 17 donde apreciamos que el 80% corresponde al punto Q de quiebre de la línea A y de la línea B correspondientes a las corrientes presuntas de rayos negativos descendentes (ver el anexo B y la figura 19)

Las funciones  $P\% = P_{rb}(I \geq I_p) = F[H; (x_c/H)]$  “siguen” las líneas A y B de las corrientes  $I_p$  de los RND. La IEC estableció desde 1990 los cuatro niveles de protección contra rayos NPCR I, II, III y IV cuyas corrientes mínimas  $I_p$  hemos representado en la figura 19. Allí observamos que esas corrientes están en la línea A. Es decir que las probabilidades de atracción de RND están en el intervalo a) de la tabla 2 donde notamos que hay una superposición entre las alturas H para la relación  $(X_c/H) = 3$  con las alturas H para  $(X_c/H) = 1$ .

---

## Capítulo 7 - Conclusiones

Los autores proponen lo siguiente:

- para alturas  $2 \text{ m} \leq H \leq 10 \text{ m}$ : adoptar  $(X_c/H) = 3$
- para alturas  $11 \text{ m} \leq H \leq 60 \text{ m}$ : adoptar  $(X_c/H) = 1$

Esta propuesta surge de verificar las probabilidades para  $H = 10 \text{ m}$  en la figura 17.

En nuestra norma argentina IRAM 2184-1-1 (futura segunda edición) se está estudiando la introducción del criterio antes expuesto por los autores. Con éste criterio se pretende armonizar los métodos de cálculo de las áreas equivalentes  $A_e$  teniendo en cuenta la altura  $H$  de la estructura, de la manera siguiente:

a) Para alturas  $H$  tales que  $2\text{m} \leq H \leq 10\text{m}$ , se puede adoptar la relación  $(X_c/H) = 3$  para calcular  $A_e$ .

b) Para alturas  $H$  tales que  $11\text{m} \leq H \leq 60\text{m}$ , se puede adoptar la relación  $(X_c/H) = 1$  para calcular  $A_e$ .

Siguiendo el criterio que expusieron el colega argentino A. A. Reyna y el colega brasileño L. Martins Neto [1], que sugirieron armonizar con las normas IEC a las normas nacionales argentina IRAM y las nacionales brasileñas NBR, en nuestro trabajo pretendemos demostrar que el cálculo de  $A_e$  es función de la altura  $H$  de la estructura a proteger.

En consecuencia: el criterio de la IEC  $[(X_c/H)=3]$  y el criterio brasileño y británico  $[(X_c/H)=1]$  son válidos según sea la altura  $H$  de la estructura afectable por rayos directos, según nuestra propuesta.

**Tabla 1**

Funciones log-normales de las probabilidades de "atracción" de rayos negativos descendentes "cortos" ( $T_d < 2\text{ms}$ ) de una punta FRANKLIN aislada ("solitaria") de altura H en campo abierto.

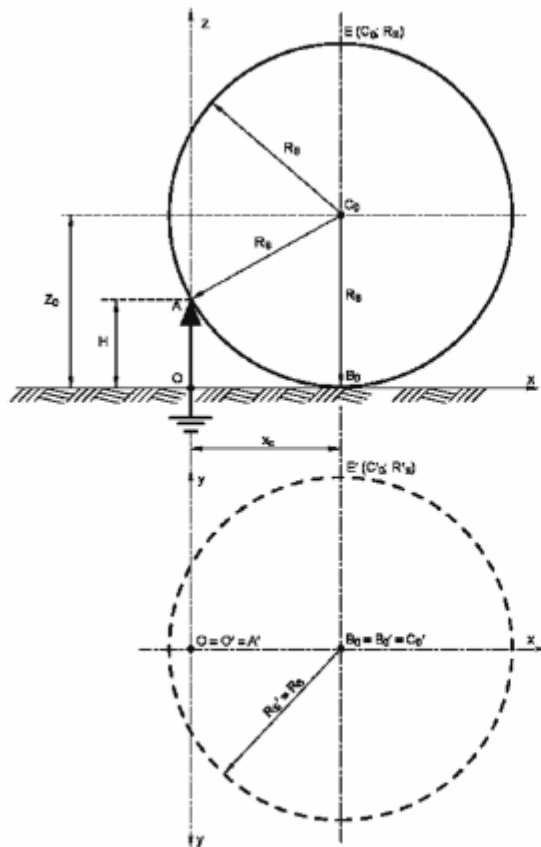
Curva	Relación ( $X_c/H$ )	Promedio H (50%)	$\sigma$ (log H)	Parte de la curva (fig.5)
①	1	(152m) <sup>(*)</sup>	0,39	Línea A
①	1	98m	0,17	Línea B
②	2	(66m) <sup>(*)</sup>	0,39	Línea A
②	2	43	0,17	Línea B
③	3	(36m) <sup>(*)</sup>	0,41	Línea A
③	3	20	0,18	Línea B

<sup>(\*)</sup> = valor calculado por extrapolación de las líneas A en el PPLN-2 (papel probabilístico log-normal/logaritmico)

**Tabla 2**

Probabilidades de atracción de rayos negativos descendentes (RND) de una PF aislada en campo libre para las gamas de alturas H y las relaciones ( $x_c/H$ ) indicadas (figura 5)

Intervalos	Probabilidades de atracción de RND	Relación ( $X_c/H$ ) = 3	Relación ( $X_c/H$ ) = 1
		Alturas H (aprox.)	Alturas H (aprox.)
a)	del 99,9% al 80%	2m a 15m	9m a 70m
b)	del 80% al 5%	16m a 40m	71m a 190m



Vista del plano diámetro  $xOz$  de la esfera "rodante"  $E(C_0; R_s)$  que es perpendicular al plano de tierra  $xOy$  en el punto  $B_0$

Vista en planta del plano  $xOy$  de apoyo de la esfera "rodante"  $E(C_0; R_s)$  en el punto  $B_0 \approx B'_0 \approx C'_0$   
 Nota: Las primas son las proyecciones ortogonales de los puntos o de los segmentos

Figura 13 - Punta Franklin (PF): "OA" y esfera "rodante"  $E(C_0; R_s)$  pasante por A y por el plano de referencia  $xOy$  de "tierra eléctrica" de la PF "OA". Vistas diametral  $xOz$  en planta  $xOy$ .

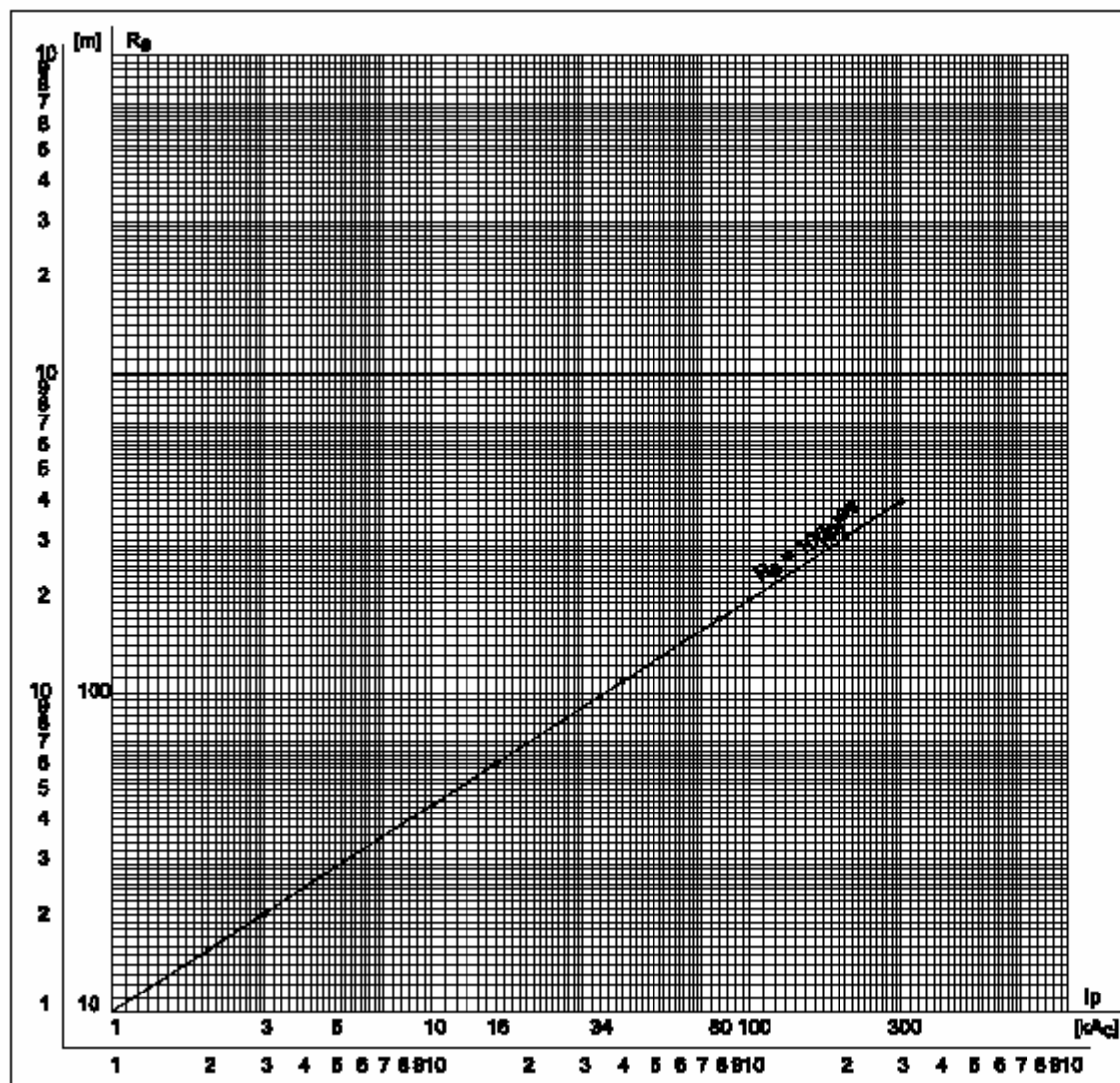


Figura 14 - Función  $R_s = (I_p)^{2/3}$  en coordenadas logarítmicas

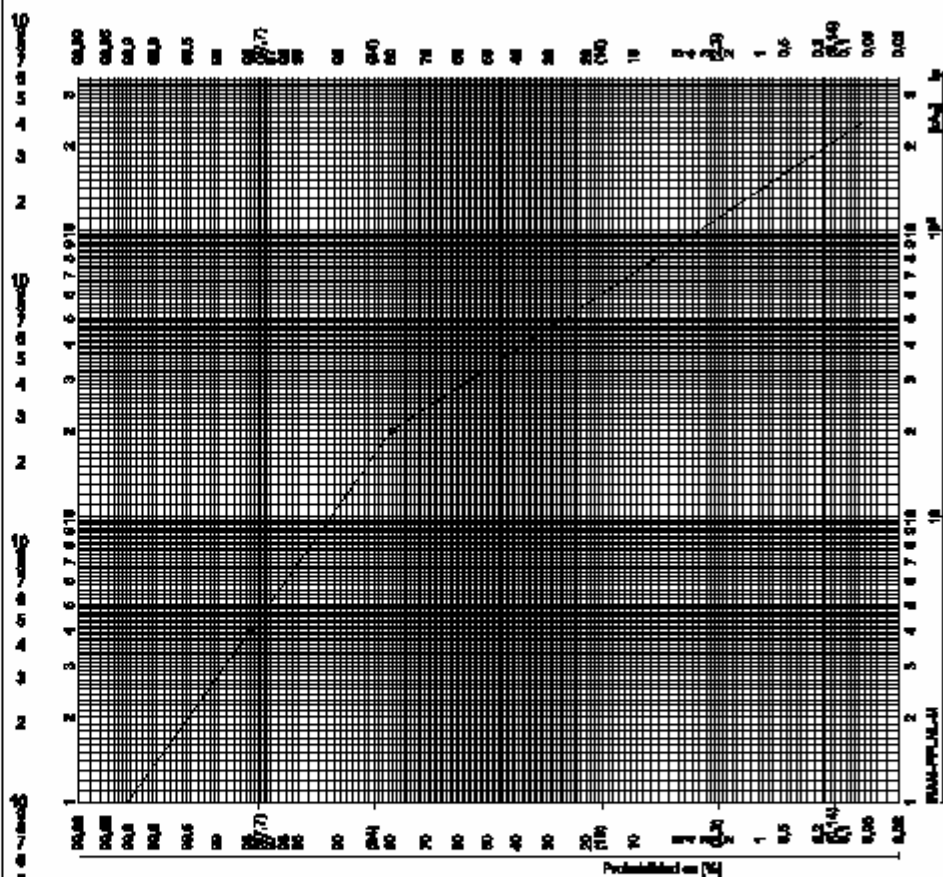
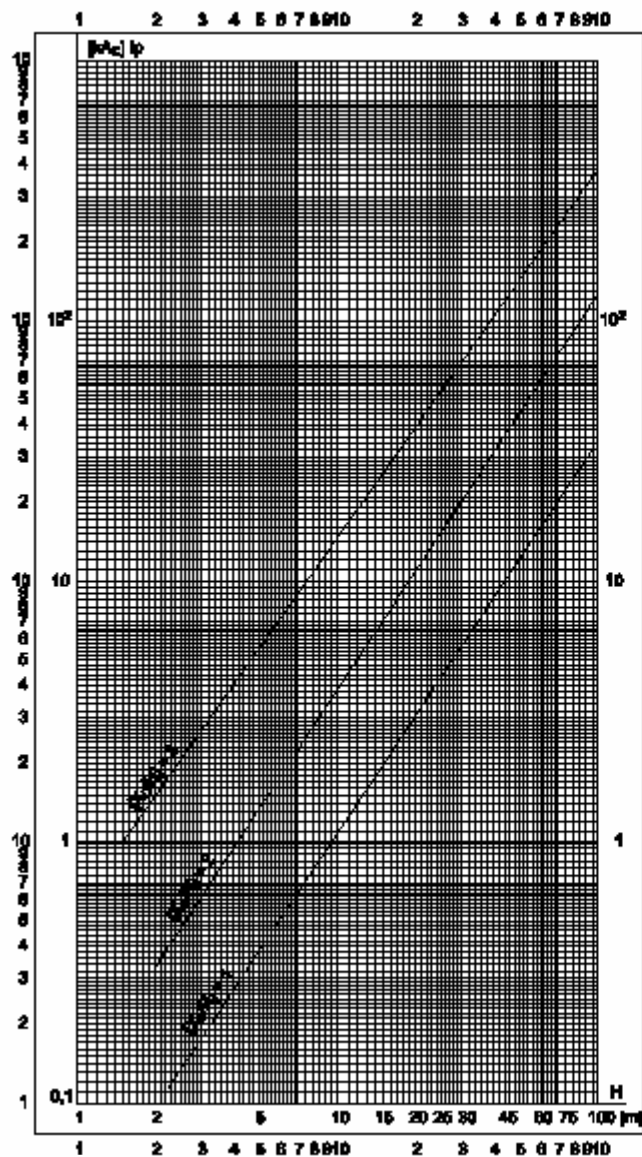


Figura 15 - Nomograma con las funciones  $I_p = f [H; (X_c/H)]$  a la izquierda e  $I_p = F [Prb (>I_p)]$  a la derecha, con ejes  $I_p$  (kAc) comunes a ambas funciones (ver el 6.1)

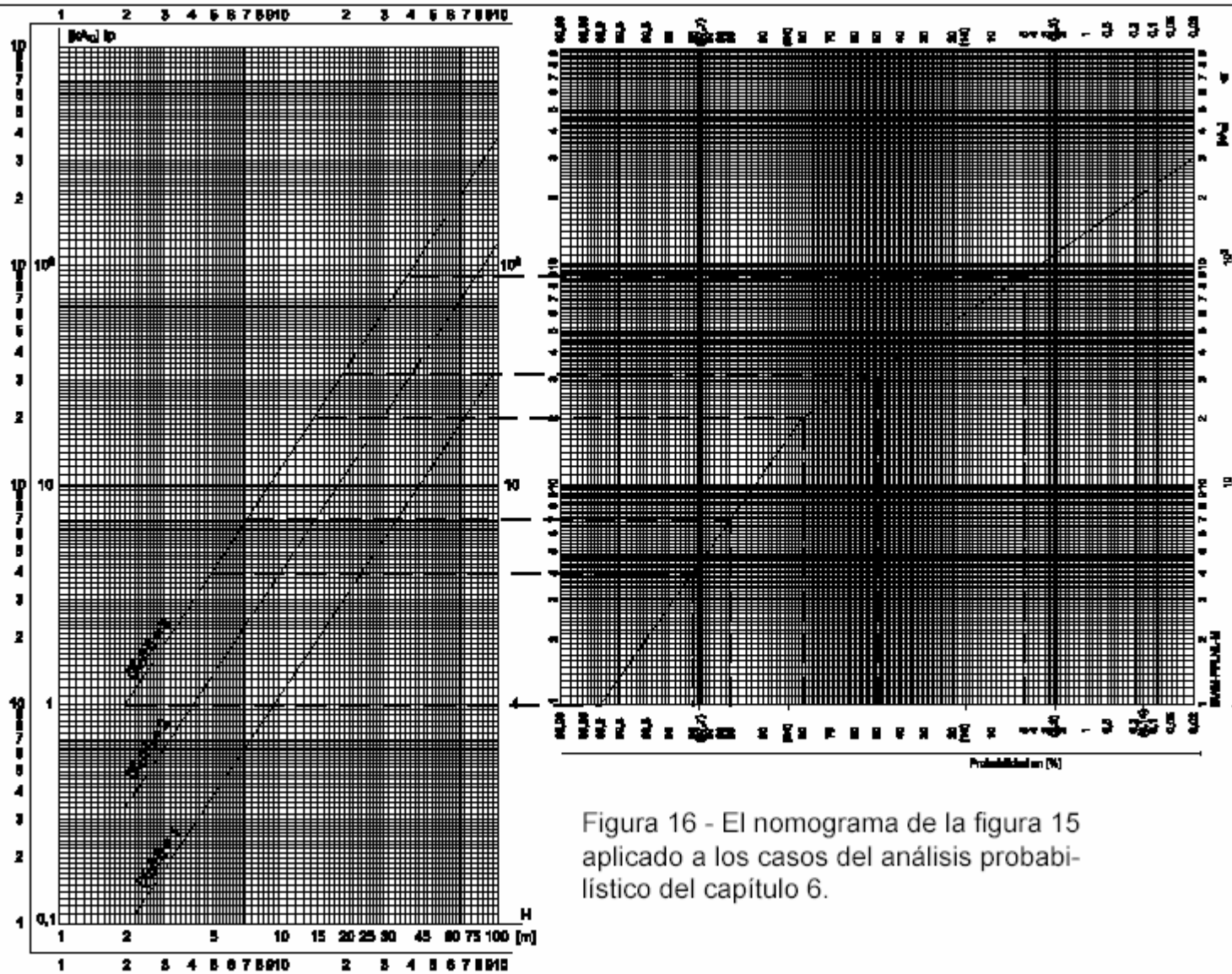


Figura 16 - El nomograma de la figura 15 aplicado a los casos del análisis probabilístico del capítulo 6.

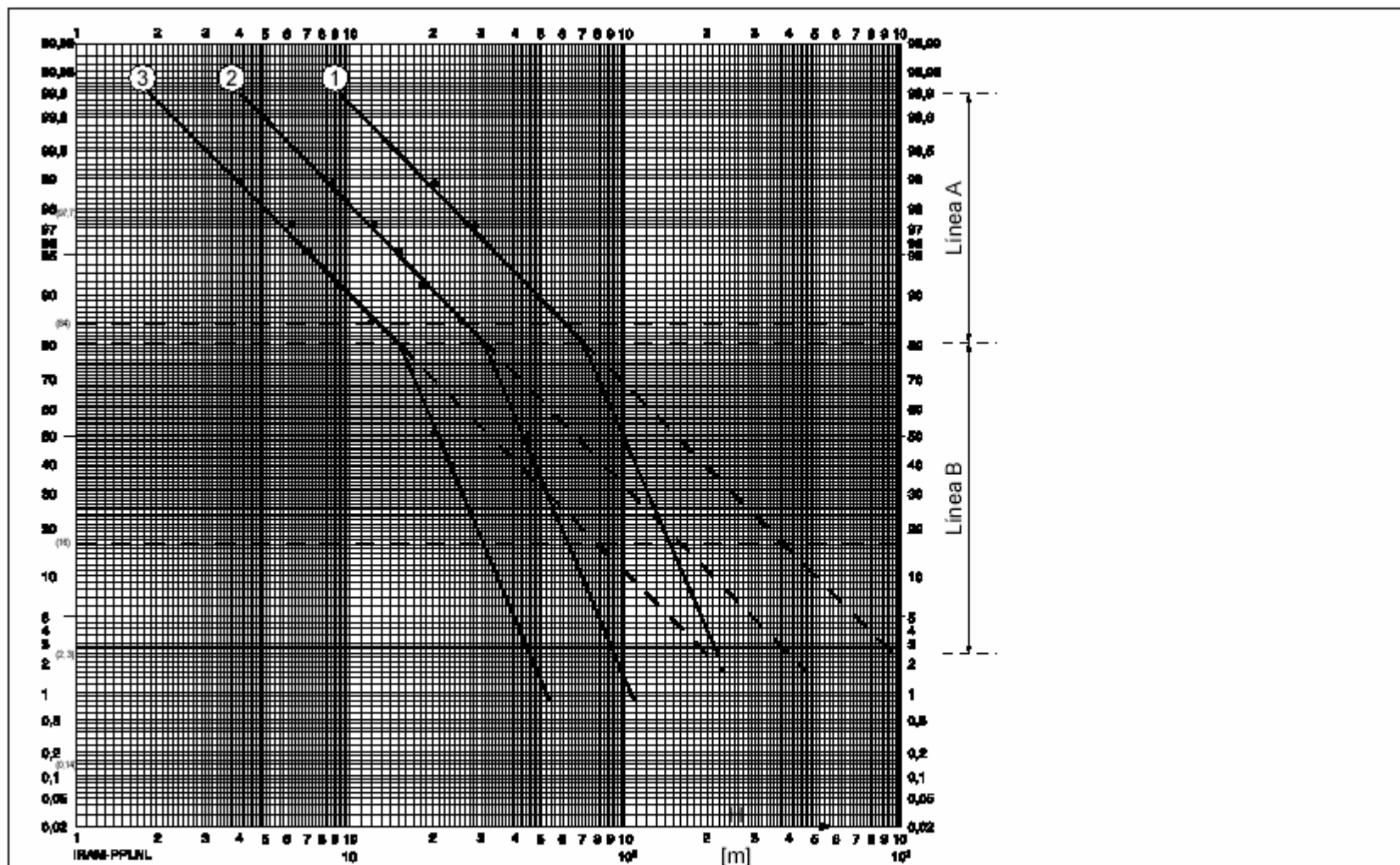


Figura 17 - Distribución de probabilidades de "atracción" [%] de rayos negativos descendentes "cortos" (con duraciones menores que 2ms) para una Punta Franklin "aislada" ("solitaria") de altura H en el campo libre, siendo la curva ① para  $(X_c/H) = 1$ , la curva ② para  $(X_c/H) = 2$  y la curva ③ para  $(X_c/H) = 3$

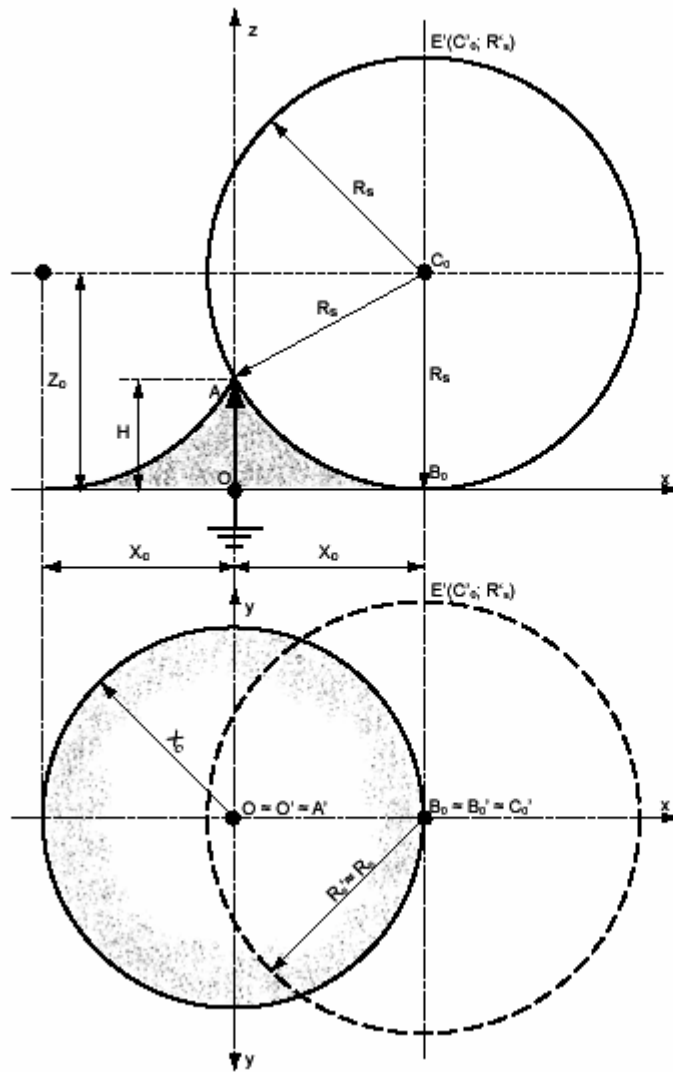


Figura 18 - Área colectora de rayos (negativos descendentes "cortos") equivalente de la PF OA. El área colectora  $A_e = \pi X_c^2$  es la del círculo de radio  $X_c$  y centro  $O \approx O' \approx A'$

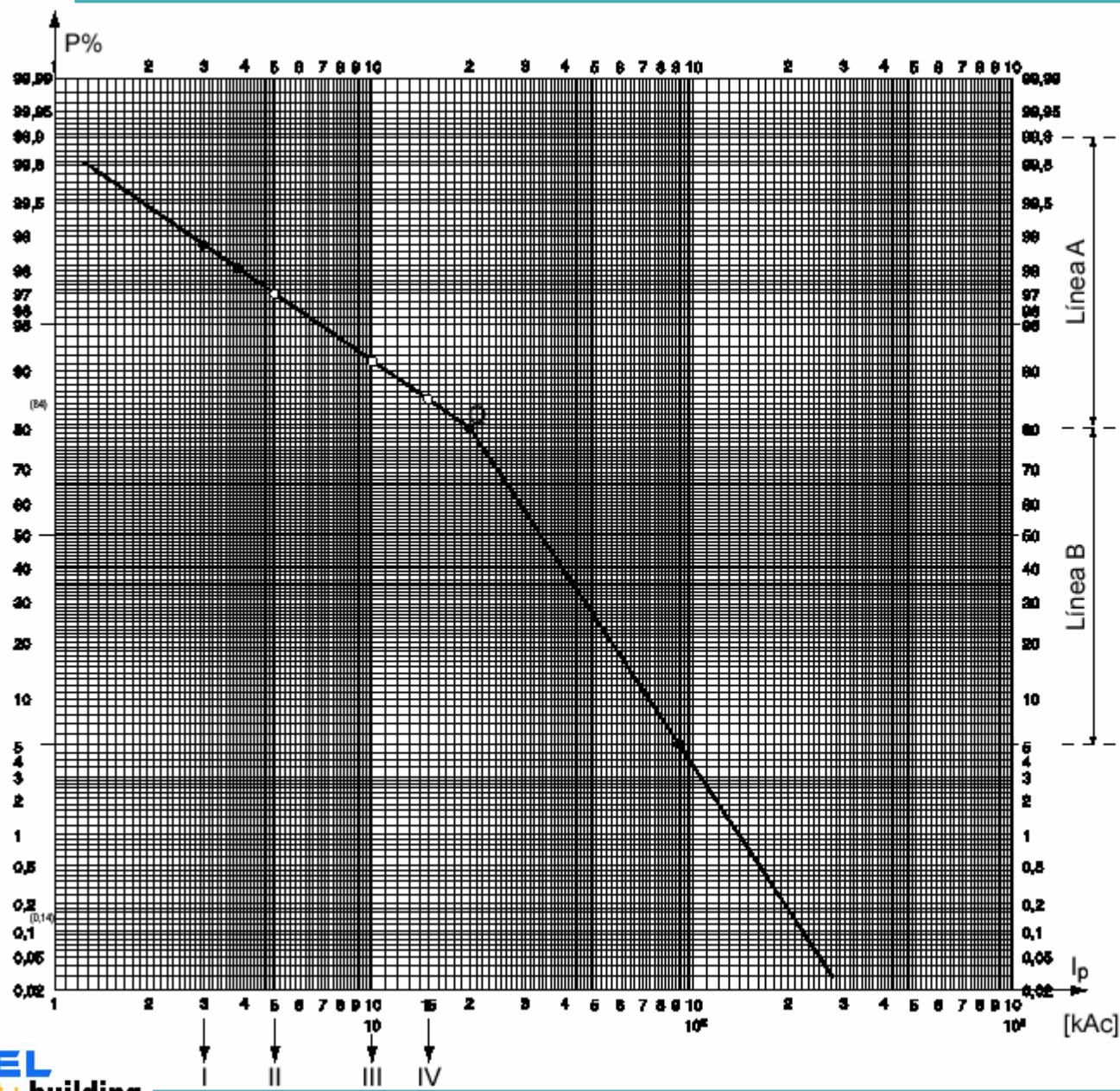


Figura 19 - Niveles de protección contra rayos (NPCR) según la IEC: I, II, III y IV trazados en la curva  $P\% = Prb(I \geq I_p)$  para rayos negativos descendentes

---

## **ANEXO A**

### **Rescapitulacion de algunos conceptos sobre rayos a tierra**

#### **A.1) Un "pantallazo" del fenómeno físico (ver la Fig. A.1)**

La "historia" de un rayo que "cae" a tierra comienza con el aumento de la actividad eléctrica atmosférica en el lugar donde "caerá" ese rayo, a causa de las tormentas eléctricas que producen la separación de cargas eléctricas de polaridad opuesta dentro de las nubes. No necesitamos una descripción teórica/científica de este fenómeno físico. Nos basta decir que en más del 90% de los casos, la nube presenta, en su parte inferior (o "base"), una notable cantidad de cargas eléctricas de polaridad negativa (decenas a centenas de coulomb) y en su parte superior (o "cima") otra cantidad de cargas eléctricas positivas del mismo orden de magnitud que las negativas de la "base". Dentro del espacio de aire comprendido entre la nube y el suelo se genera un campo eléctrico cuyas líneas de campo ("líneas de fuerza") que "salen" de la nube se "cierran" en la tierra sobre iguales cargas de polaridad opuesta a la polaridad de la base de la nube.

#### **A.2) Fases de la descarga ("caída") a la tierra de un rayo negativo descendente nube-tierra.**

El rayo "negativo" transporta cargas negativas a la tierra.

En la figura A.2 se ilustran las fases siguientes:

- a) Arrancando en la nube, una corriente negativa de electrones emerge como una "chispa" o "efluvio" que es una descarga oscura llamada descarga "guía de pasos" ("stepped-leader") o "trazador descendente" (de la nube a la tierra).
- b) Este "trazador descendente" avanza de a pasos o a saltos de unos 50m de largo a una velocidad del 0,1% de la velocidad de la luz en el vacío  $C_0 = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$ .
- c) El trazador descendente se puede encontrar con un trazador ascendente a unos 50m de la tierra. Cuando se encuentran los caminos o trayectorias ionizadas de ambos trazadores, forman un solo canal iónico entre la nube y la tierra.
- d) A este canal iónico lo recorrerá una descarga de retorno (de cargas de la tierra a la nube) que es visible (dibujado en línea gruesa) y tiene una velocidad del 10% de  $C_0$ .
- e) Cuando la descarga de retorno concluye, unas descargas internas de la nube (llamadas "trazadores corona J y K" - "J and K streamers"-) se extienden hacia el canal iónico nube-tierra.
- f) Algunas veces otra "chispa" o descarga descendente llamada trazador en dardo o flecha ("dart leader") inicia un segundo rayo de retorno en ese mismo canal iónico nube-tierra.

En la foto A se ilustra la ramificación típica de canales iónicos de un rayo descendente nube-tierra y en la foto B, la

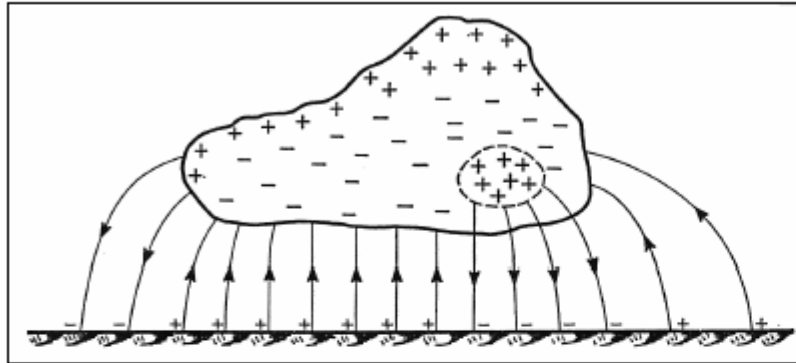


Figura A.1: distribución de cargas eléctricas dentro de la nube y el campo eléctrico "nube-tierra" [7]

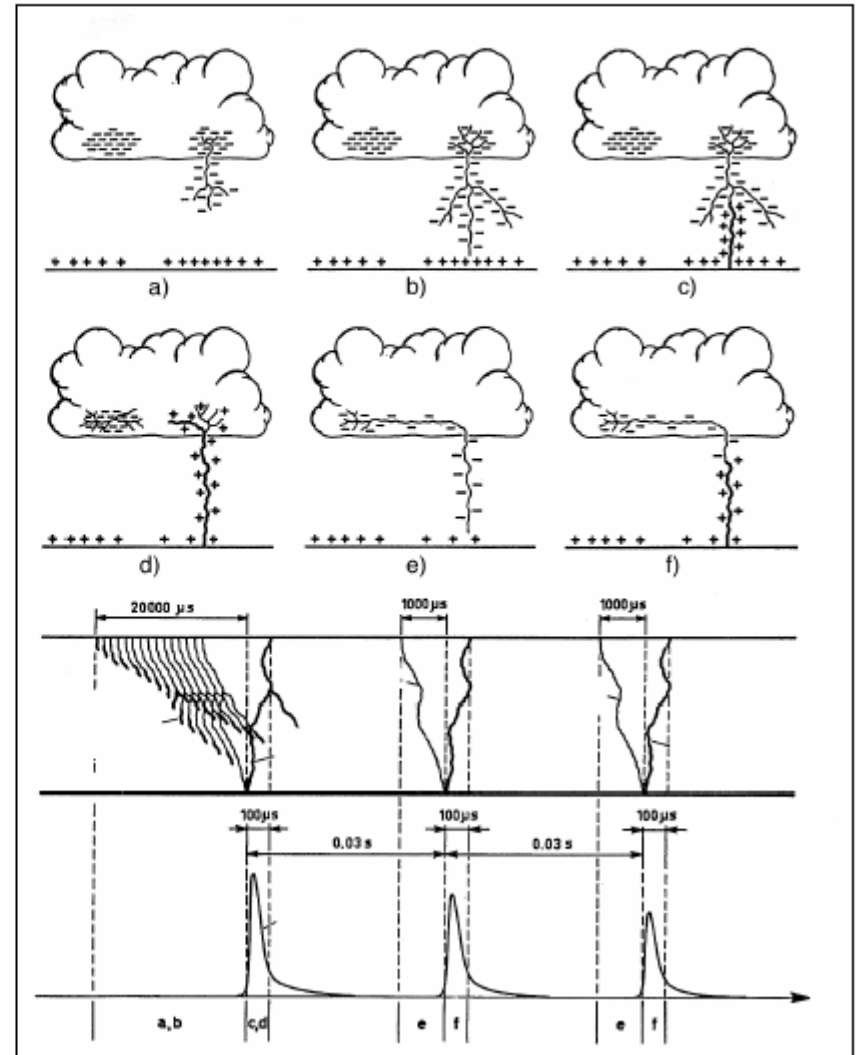


Figura A.2: Rayo negativo descendente, Fases a), b), c), d), e) y f) de la descarga de un rayo negativo "nube-tierra" [3]

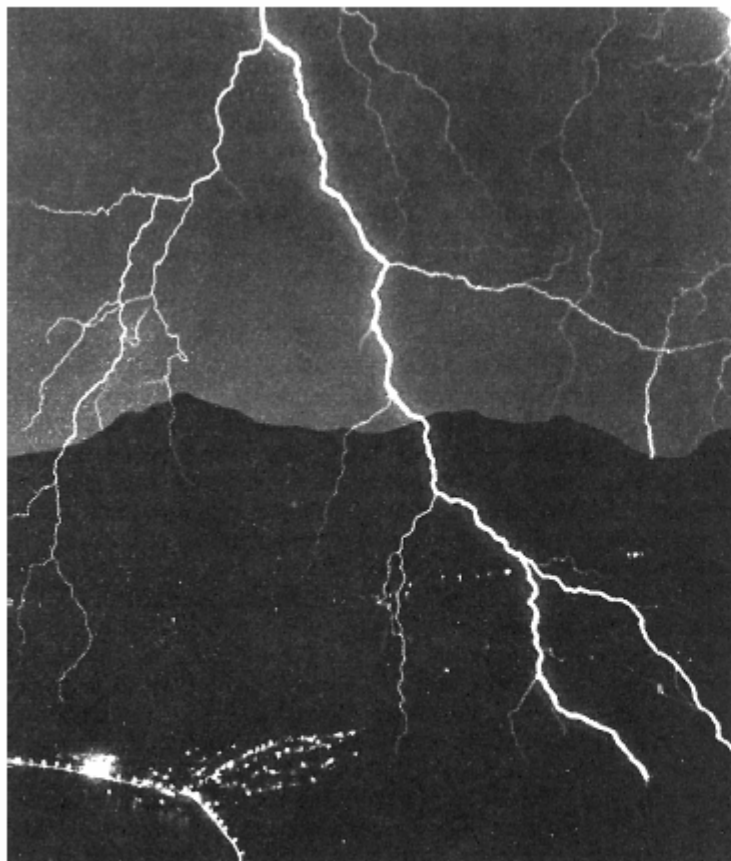


Foto B: Rayo ascendente - Ramificación típica de los canales iónicos [7]

Foto A: Rayo descendente - Ramificación típica de los canales iónicos [7]

## ANEXO B

### Aplicaciones de la distribución probabilística "log-normal" (DPLN) a la ingeniería de la protección contra los rayos.

#### Estudio de los parámetros de los rayos ([7] [8] [9] [10] [11] de la bibliografía citada al final)

Hay quince parámetros de los rayos en las NORMAS ARGENTINAS IRAM:

- a) IRAM 2184-1:1996 (IEC 1024-1: 1990) -Protección de las estructuras contra las descargas eléctricas atmosféricas - Parte 1: Principios generales. (Edición del año 2000).
- b) IRAM 2184-1-1: 1997 (IEC 1024-1-1: 1993 - Protección de las estructuras contra las descargas atmosféricas. Guía A. Elección de los niveles de protección para los sistemas de protección contra descargas eléctricas atmosféricas. (Edición del año 2000).

En estas normas se representan los quince parámetros en 15 «curvas» que son «rectas» ,cuando se dibujan en el PLPLN (Papel probabilístico log-normal). Mediante las estadísticas CERAUNICAS (europeas, sudafricanas, estadounidenses, japonesas, malayas, etc. ) la IEC, a través de su TC 81 («Lightning Protection»), «normalizó» estos parámetros que ahora son más de veinte. (IEC 62305-1). Como un ejemplo de esos últimos estudios en IEC (año 2006), presentamos las cuatro «curvas» 1A, 1B, 2 y 3, de las corrientes de cresta de RAYOS «CORTOS» ( $T_2 < 2\text{ms}$ ), cuyos valores básicos tabulamos en nuestra tabla B1 y representamos gráficamente en la fig. 5. Debemos hacer notar que la dispersión  $\sigma^*$  (log I) es la desviación normal del logaritmo decimal.

Estas curvas son las resultantes del cálculo de regresión para AJUSTAR los centenares o miles de resultados EXPERIMENTALES, a las MEDIANAS DE MAXIMA VEROSIMILITUD del MODELO de la ley probalística teórica log-normal DPLN.

Debemos señalar que los primeros impulsos negativos tienen una DPLN «doble»: la DPLN de la curva 1A que se «corta» en 20 kAc donde «arranca» la DPLN de curva 1B. Todavía no se encontró ninguna explicación científica a esta «curva» quebrada 1A-1B. (ver fig. 5).

Sin embargo, como bien lo señaló Andrew John ERIKSSON junto con R.B. Anderson [9], la curva 1A definida entre 4 kAc y 20 kAc («shielding currents») tiene su aplicación para estudiar las corrientes de rayos directos a líneas aéreas de transmisión LAT ( que pueden «anular» el efecto de «apantallamiento» de los cables de guarda y provocar un «corte» en la transmisión de energía de esa LAT).

También se aplican para definir los niveles normalizados de protección (NDP) de los sistemas de protección contra rayos (SPCR) de estructuras civiles (IRAM 2184-1 e IRAM 2184-1-1).

La curva 1B (entre 20 kAc y 90 kAc) representa las corrientes que ERIKSSON y ANDERSON llaman «back-flash currents», es decir, son aquellas corrientes que pueden producir arcos «inversos» o «de retorno» que «parten» de los soportes hacia los conductores de fase de las LAT y pueden interrumpir el servicio eléctrico («corte» de energía).

Rayos "cortos"	Frecuencias acumuladas (%)					Curva en el PL- PLN (fig. A1)	Valor Medio (kAc)	$\sigma^*$ (log I)
	98%	95%	80%	50%	5%			
	kAc	kAc	kAc	kAc	kAc			
Rayos negativos: Primeros impulsos negativos	4		20			1A	(61,1)	0,576
			20		90	1B	33,3	0,263
Subsiguientes Impulsos negativos		4,9		11,8	28,6	2	11,8	0,233
Rayos Positivos Simples: Primeros impulsos positivos (de una sola componente)		4,6		35	250	3	33,9	0,527

Tabla B.1 - Valores básicos de corrientes de cresta I (kAc) de rayos "cortos" ( $T_2 < 2\text{ms}$ ) según la norma IEC 62305 - Ed. 1:2006.

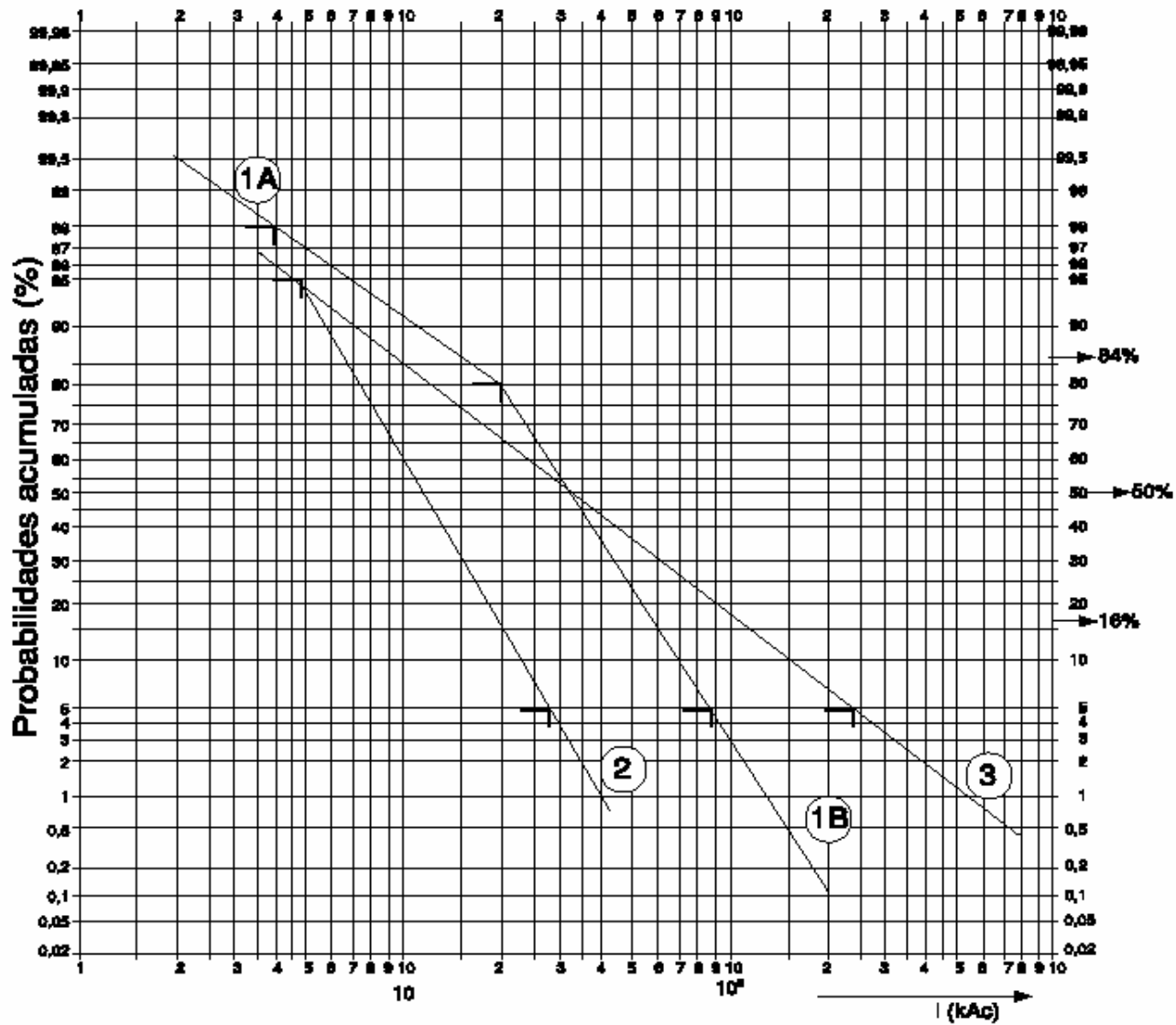


Figura B.1 - Curvas de las corrientes de cresta de rayos correspondientes a la tabla A.1

---

## Bibliografía del ANEXO B

-A) Bibliografía particular consultada para la Nota Científico Técnica: “Las funciones probabilísticas Logaritmo-normales, y sus representaciones gráficas”, de Ing. Juan Carlos Arcioni.

- [1] Martin A. UMAN: «The lightning discharge». Editors Academic Press, Orlando, Florida, U.S.A., 1987.
- [2] Brown Boveri and Co. Ltd: Dielectric Stresses and Coordination of insulation: «Data for planning H.V. switchgear installations»; Publication CH-A050020E, Baden, Switzerland, 1976.
- [3] Ronald E. Walpole, Raymond M. Myers, Sharon L. Myers: «Probabilidad y estadística para ingenieros» (6° Edición). Editorial PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA S.A., México, 1999.
- [4] Murray R. SPIEGEL: «Probabilidad y Estadística». Editorial Graw Hill - Interamericana de México S.A., 1998.
- [5] ISO (International Organization for Standardization), International Standard ISO 5479: 1997 (E): «Statistical interpretation of data tests for departure from normal distribution».
- [6] María Teresa GIL, Cecilia Inés FLORIT: «Probabilidad y estadística» - Editorial Nueva Librería SRL - Buenos Aires, 1994.
- [7] F. Popolansky: «Frequency Distribution of Amplitudes of lightning currents»; Revista ELECTRA, CIGRÉ [SC 33(Checoeslovaquia)], París, N° 22, Mayo 1972, (pp 139-147).
- [8] Karl Berger, R.B. Anderson, H. Kröninger: «Parameters of lightning flashes»; Revista ELECTRA, CIGRÉ (SC 33) París, N°41, Julio 1975, (pp 23).
- [9] R.B. Anderson, A.J. Eriksson: «Lightning parameters for engineering application»; Revista ELECTRA , CIGRE, París, N° 69, Marzo 1980, (pp 65-101).
- [10] M.Darveniza; F. Popolansky; E.R. Whitehead: «Lightning protection of UHV transmission lines»; Revista ELECTRA, CIGRÉ , París , N° 41, julio 1975, (pp 39-69).
- [11] N.I. Petrov, F. D'Alessandro: «Determination of the dependency of average ground flash density and its scatter upon keraunic level from observation data» - VI SIPDA (Sixth International Symposium on Lightning Protection) November 2001, Santos, BRAZIL Proceeding, pp 69-74).
- [12] Kurt GIECK: «Manual de fórmulas técnicas: Ciencia, Ingeniería, Tecnología». 19ª Edición en español de la 29ª edición alemana, Editorial ALFAOMEGA, México, 1999.

---

B - Bibliografía general consultada sobre probabilidades y estadísticas:

[13] B.V. Gnedenko, A.I. Jinchin: «Introducción al cálculo de Probabilidades» - Editorial EUBEDA - Ediciones COLIHUE, Buenos Aire, 1988.

[14] André Vessereau: «La estadística». Editorial EUDEBA, Buenos Aires, 1968.

[15] V.E.Gmurman: «Teoría de las probabilidades y estadística matemática» - Editorial MIR Moscú, 1974.

[16] Luis Antonio SANTALÓ: «Probabilidad e inferencia estadística» - Monografía N°11 - OEA Washington DC, USA, Tercera edición,1980.

[17] M.J. MORONEY: «Facts from figures», PENGUIN BOOKS, Ltd, London, Third Edition, 1956.

[18] M.J. MORONEY: «Hechos y Estadísticas» (Traducción de [17] por Vicente Vázquez Presedo), EUDEBA, Buenos Aires, 1965.

[19] Jorge Adolfo NÚÑEZ, Armando Luis NÚÑEZ, Luis Roque ARGUELLO: «Probabilidades y elementos de estadística», Editorial Nueva Librería, Buenos Aires, 1983.

[20] Gustavo Eduardo D'ELIA: «Teoría de las probabilidades. Estadística Matemática». Librería y Editorial ALSINA, Buenos Aires, 1999.

### **Bibliografía general de este trabajo**

[1] A. A. Reyna; L. Martins Neto: "Standards for protection of structures against lightning based on IEC in Mercosur countries" pp 301-306, Proceedings of the VI. International Symposium on Lightning Protection (SIPDA, 19.-23.11.2001 in Santos/Brasil. Proceedings. Sao Paulo/Brasil: Institute of Electrotechnics and Energy of the University, 2001.

[2] N. I. Petrov; F. D'Alessandro: "Lightning to earthd structures: Comparision of models with lightning strikes data"; 25<sup>th</sup> I.C.L.P.-Rhodes-Greece-2000, "paper" 4.4 (pp. 346-351).

[3] N. I. Petrov; G. N. Petrova; R. T. Waters: "Determination of attractive-area and collection volume of earthed structures"; 25<sup>th</sup> I.C.L.P.-Rhodes-Greece-2000, "paper" 4.10 (pp. 374-379).

[4] J. A. Arcioni; J. F. Giménez: "La "esfera rodante" y la protección contra rayos" ("una presentación del método de la "esfera rodante" para el diseño de sistemas de protección contra rayos"), Revista Ingeniería Eléctrica, Bs. As, N° 177, Mayo del 2004.

[5] [6] A. A. Reyna: "Terminales captores de rayos y sus ángulos de protección", "Parte I": Revista Ingeniería Eléctrica, Bs. As., N° 175, Marzo 2004; "Parte II": Revista Ingeniería Eléctrica, Bs. As., N° 176, Abril 2004.

[7] J. C. Arcioni: "Los rayos a tierra y las "corrientes continuativas"", Revista Ingeniería Eléctrica, Bs. As., N° 192, Septiembre 2005.

[8] J. C. Arcioni: "Las funciones probabilísticas "logaritmo-normales", y sus representaciones normales", Revista Ingeniería Eléctrica, Bs. As., N° 178, Junio 2004.