

► Las distancias de cebado (o disruptivas) de rayos a tierra y los radios de la esfera rodante en la protección contra los rayos

Presentamos una recapitulación de conceptos sobre la física básica de los rayos, y definimos la distancia de cebado (también llamada “distancia disruptiva” o “de impacto” o “de atracción de rayos”) por una punta o una estructura puesta a tierra. Comentamos varias expresiones matemáticas de estas distancias y su relación con los radios de la esfera rodante.

1. Los radios de la esfera rodante del método electrogeométrico para diseñar las protecciones contra rayos y las distancias de atracción de los rayos en los pararrayos

1.1 En el “Anexo A”, recopilamos los conceptos de la física básica de los rayos, la actuación de los pararrayos y los modelos matemáticos del impacto de los rayos [13].

1.2 En el apartado A.4 del Anexo A, definimos la distancia disruptiva –DS-, también llamada “distancia de cebado” (de un arco eléctrico) -ver figura A2-. La distancia D_s es una función de la corriente presunta I_p del trazador positivo ascendente del retorno de las cargas positivas de la tierra a la nube que fueron inducidas en la tierra por el trazador descendente nube-tierra, que desplaza las cargas negativas de la nube a la tierra.

La distancia disruptiva o de cebado D_s es una función de la corriente presunta \hat{I}_p , que se expresa con la fórmula (1).

$$(1) \quad D_s = a \cdot \hat{I}_p^b$$

Siendo:

D_s (m), la distancia disruptiva o de cebado.

a (m), un coeficiente empírico.

\hat{I}_p (kAc), la corriente presunta (valor de cresta).

b (adimensional), un exponente empírico

En la figura 1, representamos la fórmula 1 en las líneas A, B y C.

Tabla 1. Distancias disruptivas D_s según distintos autores, siendo $D_s = a \cdot I_p^b$

	Coficiente a de (1)	Exponente b de (1)	Autores
A	10 m	0,67	IEEE / IEC [9]
B	7,11 m	0,75	E. R. Whitehead [9]
C	1,9 m	0,90	VC, VR, NT [17]

2. Los radios de la esfera rodante R_s para las distancias $D_s = a \cdot \hat{I}_p^b$ y las corrientes presuntas I_p de retorno

El radio R_s de la esfera rodante (o ficticia) del modelo electrogeométrico [9] se define que es igual a la distancia disruptiva o de cebado D_s .

Tenemos entonces la igualdad siguiente:

$$(2) \quad R_s = D_s = f(\hat{I}_p) = a \hat{I}_p^b$$

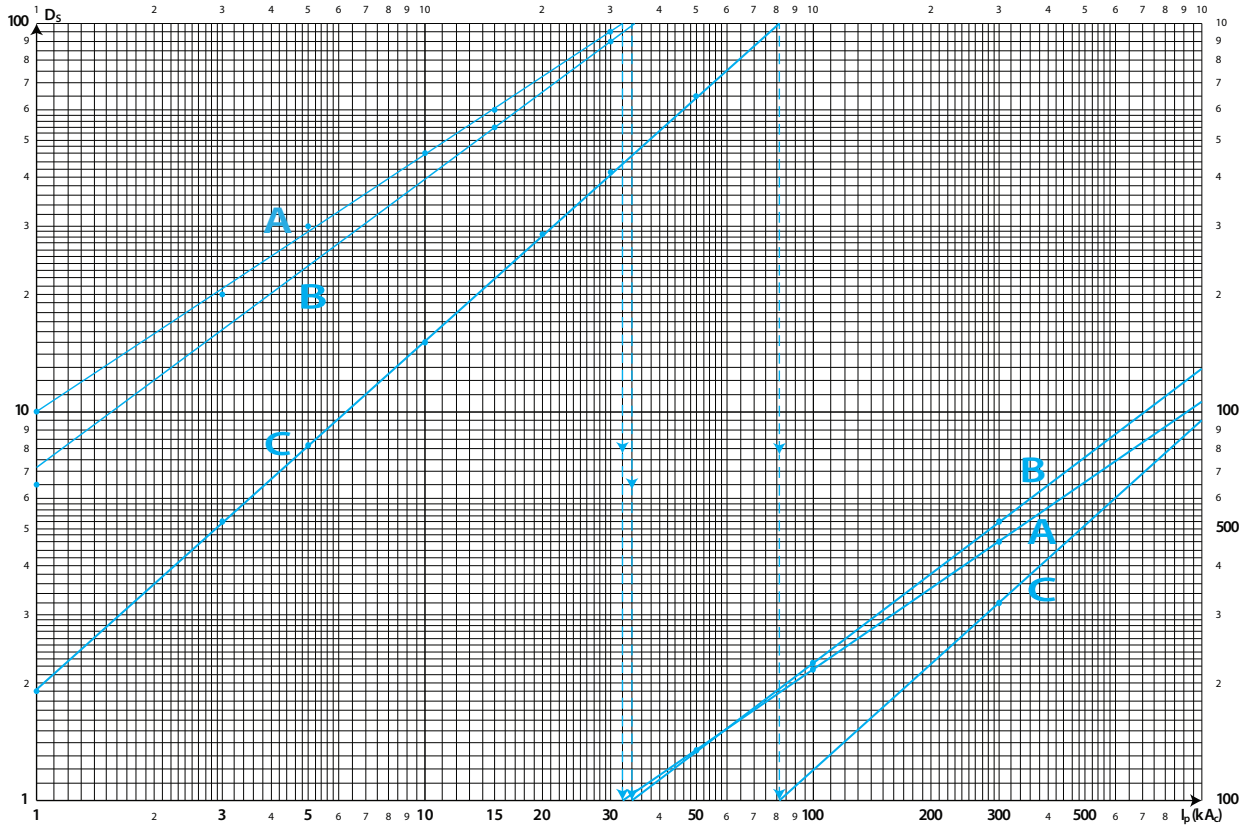


Figura 1. Distancias disruptivas $D_s = a (I_p)^b$ en líneas A, B y C de la tabla 1.

A continuación, estudiamos los radios $R_s = 10 \hat{I}_p^{0.67}$ y $R_s^* = 1,9 \hat{I}_p^{0.9}$ de la tabla 1.

Caso 2.1. Comparación entre los radios R_s y R_s^* para $\hat{I}_p = \hat{I}_p^*$, que es la comparación equiprobabilística de la

tabla 2.1 y las figuras 2.1.a en coordenadas lineales y 2.1.b en coordenadas bilogarítmicas.

Conclusiones: los radios R_s son casi tres veces mayores que los R_s^* para las mismas corrientes $\hat{I}_p = \hat{I}_p^*$ de las normas IEC e IRAM-AEA.

Tabla 2.1 de radios R_s máximos y mínimos en función de la I_p y sus probabilidades $Pr_b (\hat{I}_i \geq \hat{I}_p)$ asociadas y niveles de protección (NPR)

NPR	Radio R_s	Corriente I_p	$Pr_b (\hat{I}_i \geq \hat{I}_p)$	Fórmulas $R_s = f(\hat{I}_p)$	Observaciones
I	20 m	3 kAc	99%	$R_s = 10 \hat{I}_p^{0.65}$	IEEE/IEC: IRAM 2184-3, AEA 92305-3, IRAM 2184-1, AEA 92305-1. Tablas 6 y 7
II	30 m	6 kAc	97%		
III	45 m	10 kAc	91%		
IV	60 m	16 kAc	84%		
	R_s^*	Corriente I_p^*	$Pr_b (\hat{I}_i^* \geq \hat{I}_p^*)$	Fórmulas $R_s = f(\hat{I}_p)$	Autores
I	5 m	3 kAc	99%	$R_s = 1,9 \hat{I}_p^{0.9}$	CV, VR, NT [17]
II	10 m	6 kAc	97%		
III	15 m	10 kAc	91%		
IV	23 m	16 kAc	84%		

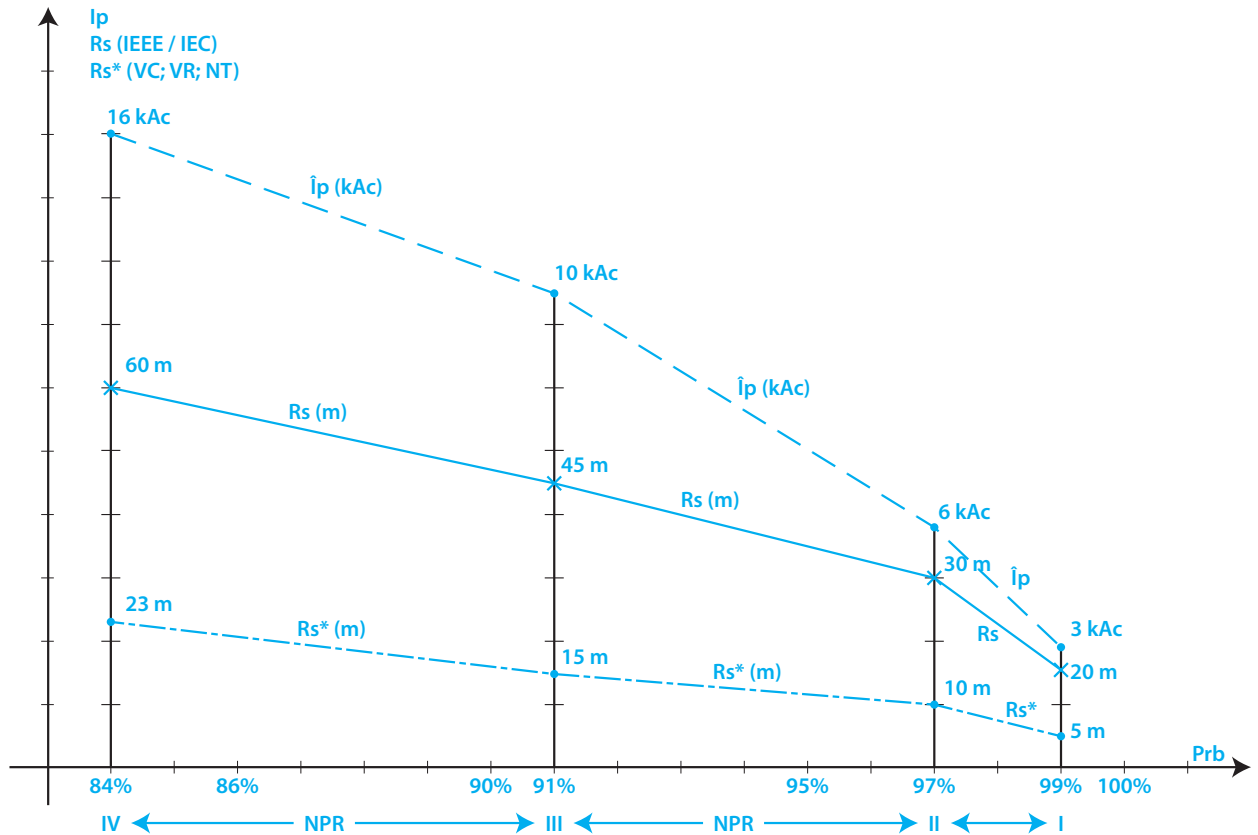


Figura 2.1.a. PCR (protección contra rayos). MDLER (métodos de la esfera rodante). Comparación equiprobabilística entre los radios de la esfera rodante R_s y R_{s^*} en función de la misma corriente presunta \hat{I}_p de la descarga de retorno tierra-nube (para los rayos negativos descendentes nube-tierra según las IEEE/IEC) y los autores Cooray, Rakov y Theetayi [17].

Tabla 2.2. Comparación entre los radios $R_s = R_{s^*}$ de la esfera rodante en función de las respectivas corrientes presuntas \hat{I}_p e \hat{I}_p^* de las descargas de retorno tierra-nube (para los rayos negativos descendentes nube-tierra) según las IEEE/IEC y los autores Cooray, Rakov y Theetayi [17].

Tabla de radios $R_s = R_{s^*}$ en función de \hat{I}_p e \hat{I}_p^* y sus probabilidades Pr_b ($\hat{I}_i \geq \hat{I}_p$) asociadas y niveles de protección (NPR).

NPR	Radio R_s	Corriente I_p	Pr_b ($\hat{I}_i \geq \hat{I}_p$)	Fórmulas $R_s = f(\hat{I}_p)$	Observaciones
I	20 m	3 kAc	99%	$R_s = 10 \hat{I}_p^{0.65}$	IEEE/IEC: IRAM 2184-3, AEA 92305-3, IRAM 2184-1, AEA 92305-1. Tablas 6 y 7
II	30 m	6 kAc	97%		
III	45 m	10 kAc	91%		
IV	60 m	16 kAc	84%		
	R_{s^*}	Corriente \hat{I}_p^*	Pr_b ($\hat{I}_i \geq \hat{I}_p^*$)	Fórmulas $R_s = f(\hat{I}_p)$	Autores
I	20 m	14 kAc	86%	$R_s = 1,9 \hat{I}_p^{0.9}$	CV, VR, NT [17]
II	30 m	21 kAc	75%		
III	45 m	34 kAc	48%		
IV	60 m	48 kAc	27%		

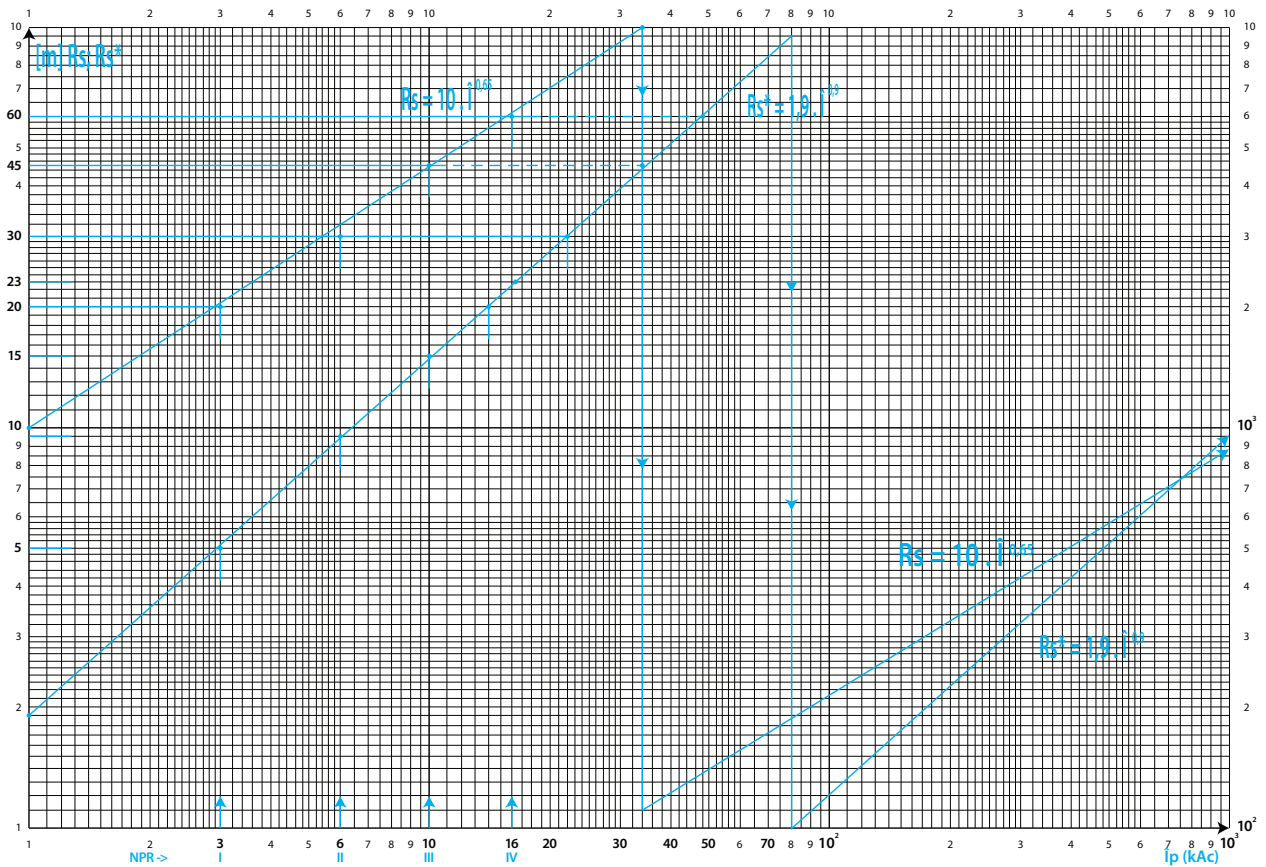


Figura 2.1.b. Comparación equiprobabilística entre R_s y R_s^* para $I_p = I_p^*$.

Caso 2.2. Comparación entre los radios iguales $R_s = R_s^*$ para las respectivas corrientes \hat{I}_p e \hat{I}_p^* de probabilidades $Pr_b(\hat{I}_i \geq \hat{I}_p)$ y $Pr_b(\hat{I}_i^* \geq \hat{I}_p^*)$ [19].

En la tabla 2.2, tenemos la comparación entre I_p e I_p^* para $R_s = R_s^*$. Notamos que $I_p^* > I_p$ para $R_s = R_s^*$ en los NPR I, II, III y IV (niveles de protección contra rayos normalizados por IEC e IRAM-AEA) de la figura 2.2.

Entre las corrientes I_p e I_p^* para cada $R_s = R_s^*$ calculamos la corriente media-geométrica: $I_{pmg} = \sqrt{(I_p \cdot I_p^*)}$, cuya expresión para el radio R_s es $R_s \approx 4,8 (I_{pmg})^{0,76}$.

3. Conclusiones generales y propuesta de los autores

3.1 En la tabla 3, comparamos las tres corrientes \hat{I}_p ,

Tabla 3. Comparación de corrientes y sus probabilidades $Pr_b(\hat{I}_i \geq \hat{I}_p)$ para $R_s = R_s^*$.

Radio $R_s = R_s^*$	Corriente \hat{I}_p	CPrb ($\hat{I}_i \geq \hat{I}_p$)	Corriente \hat{I}_p^*	Prb ($\hat{I}_i^* \geq \hat{I}_p^*$)	Corriente I_{pmg}	Prb ($\hat{I}_i \geq \hat{I}_{pmg}$)
20 m	3 kAc	99%	14 kAc	86%	7 kAc	95%
30 m	6 kAc	97%	21 kAc	75%	11 kAc	90%
45 m	10 kAc	91%	34 kAc	48%	18 kAc	81%
60 m	16 kAc	84%	48 kAc	27%	28 kAc	60%

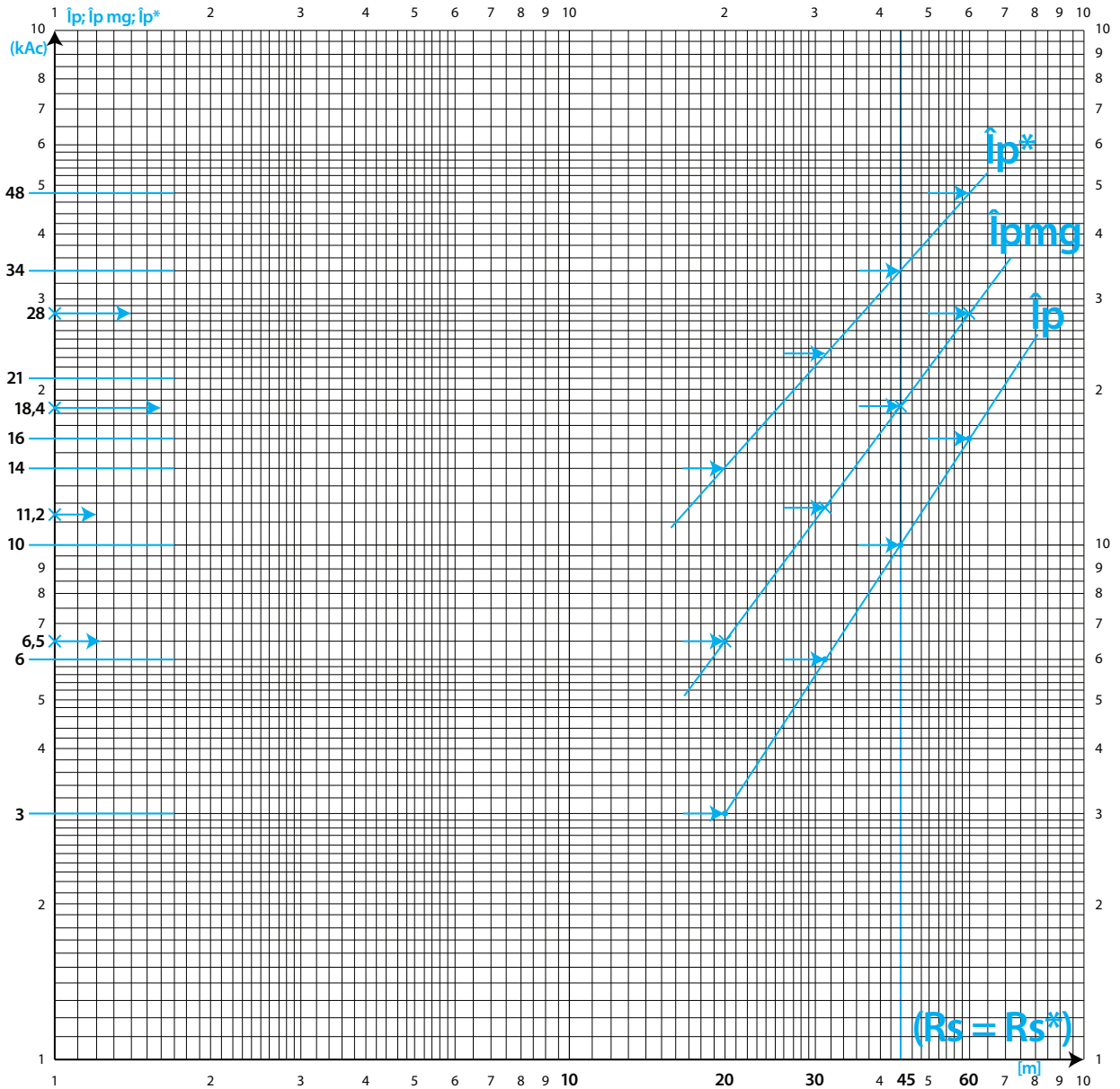


Figura 2.2. Comparación entre las corrientes \hat{I}_p , \hat{I}_{p^*} e $\hat{I}_{p_{mg}}$ para los radios $R_s = R_{s^*}$ de la esfera rodante según las IEEE/IEC y los autores Cooray, Rakov y Theetayi [17].

Nota: corrientes presuntas de las descargas de retorno a la nube de las cargas positivas (tierra-nube) (para los rayos negativos descendentes nube-tierra):

- \hat{I}_p es la corriente según IEEE/IEC.
- \hat{I}_{p^*} es la corriente según Cooray, Rakov y Theetayi [17].
- $\hat{I}_{p_{mg}}$ es la corriente media geométrica entre \hat{I}_p e \hat{I}_{p^*} .

\hat{I}_p^* e \hat{I}_{pmg} con sus probabilidades Pr_b ($\hat{I}_i \geq \hat{I}_p$) respectivas, para iguales radios normalizados de 20, 30, 45 y 60 m, que son $R_s = R_s^*$, que quedan sin cambios por hipótesis.

La expresión (2) da corrientes I_p^* , que son unas cinco a tres veces mayores que las \hat{I}_p de la (1) para $R_s = R_s^*$. Y sus probabilidades son entre el 13 y el 68% menores que las corrientes \hat{I}_p .

3.2 Por esta razón, los autores calcularon una propuesta intermedia entre I_p e I_p^* : mediante las medias geométricas I_{pmg} , siendo $\hat{I}_{pmg} = \sqrt{(I_p \cdot I_p^*)}$ que están entre los valores \hat{I}_p e \hat{I}_p^* con probabilidades intermedias que se indican en la tabla 3. Pero todas las Pr_b ($\hat{I}_i \geq \hat{I}_p$) son mayores que el 50% y se mantienen sin cambios los radios normalizados $R_s = (20, 30, 45, 60 \text{ m})$, como los autores estimaron que ocurriría en la IEC.

Anexo A. Reseña de la física de los rayos, la actuación de los pararrayos y los modelos matemáticos del impacto de los rayos.

A1. Actuación de los pararrayos, distancia de cebado o disruptiva, efectividad de las protecciones contra rayos [13].

A1.1. El impacto de un rayo en un pararrayos franklin ocurre mediante un trazador conector (*connecting leader*) que sale de la punta del pararrayos dirigida hacia el trazador descendiente por pasos que está en el extremo del rayo nube-tierra (*downcoming stepped leader*).

A1.2. La salida exitosa del trazador conector desde el pararrayos hacia el rayo descendente requiere la formación de una carga del efecto corona en el pararrayos (*streamer discharge*) que se transforme en un trazador conector (*streamer to leader transition*) que sea estable hasta su encuentro con el trazador descendente.

A1.3. Se llama "distancia de cebado" o "distancia disruptiva" D_s (*striking distance*), a la distancia que hay entre la punta del trazador negativo descendente por pasos del rayo nube-tierra y la punta del pararrayos en el momento (instante) en el cual sale un trazador ascen-

dente conector exitoso (*connecting leader*) desde ese pararrayos y se produce el salto final de ambas descargas.

A2. Fundamentos de las protecciones contra los rayos [13]

Las protecciones contra rayos clásicas o convencionales se basan en el uso de pararrayos franklin (puntas franklin) y jaulas de Faraday (método de las mallas) en los cuales su efectividad depende de:

- » El desarrollo de una descarga por efecto corona en su/s punta/s.
- » La forma de una descarga conectora ascendente (*streamer*).
- » El desarrollo de un trazador ascendente estable (*leader*) como resultado de los campos eléctricos intensos creados por la proximidad del trazador descendente del rayo nube-tierra (*downward leader*).

A3. Trazadores descendentes y ascendentes. Proceso de interconexión, modelo electrométrico del rayo negativo descendente [5].

La figura A1 muestra los conceptos básicos del inicio de un rayo negativo descendente típico a tierra (aproximadamente, 90% de los casos). En la figura A1, se muestra la equivalencia aproximada entre el sistema de cargas nube-tierra y un capacitor. Se pueden observar las líneas de potencial deformadas por la presencia de los objetos terrestres, lo que provoca la intensificación del campo eléctrico creado por la nube tormentosa eléctrica.

Un líder de pasos o descarga escalonada o trazador descendente (figura A1.b) se ha originado en la parte de la carga negativa de la nube. En la figura A1.c, se muestran los dos tipos de trazadores que se producen en el proceso de descarga. Los trazadores ascendentes libran una especie de competencia por conectarse al trazador descendente. En la figura A1.d se ha producido la conexión. En el modelo electrogeométrico a la distancia OP (figura A1.e) se la denomina "distancia disruptiva" o "de cebado" (D_s). La distancia D_s se define como la dis-

tancia entre el objeto a ser impactado y la punta del líder de pasos, en el instante que se inicia la interconexión con el líder ascendente (ver A4.b).

A4. Las tres distancias (D_i , D_s y R_a) vinculadas con el proceso del impacto de un rayo según el modelo matemático de Farouk A. Rizk [12]. (Ver figura A2).

a) La distancia D_i es la distancia entre la punta superior P_i del trazador negativo descendente (nube-tierra) y la punta del pararrayos o de la estructura (o conductor colector de rayos) desde donde sale un trazador positivo ascendente continuo (es decir, un conector entre los dos trazadores). Esta distancia D_i no se debe confundir con la distancia de cebado o distancia disruptiva D_s .

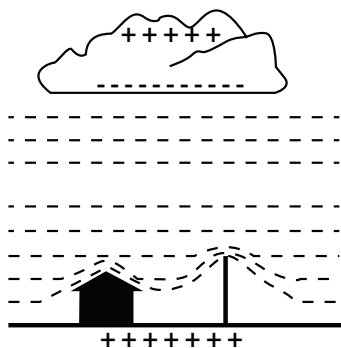


Figura A1. Proceso de descarga de un rayo a tierra (carga negativa en la nube). Adaptado de [5].

Nota: En el modelo electrogeométrico, el líder descendente debe considerarse vertical y sin ramificaciones.

b) La distancia D_s es la distancia de cebado o distancia disruptiva, que se define como la distancia entre la estructura (o el pararrayos) y la punta inferior P_s del trazador negativo descendente en el punto crítico de encuentro entre los dos trazadores. Es en el punto P_s donde el trazador negativo descendente (o una de sus ramas) cambia abruptamente de orientación en un salto final dirigido hacia el trazador positivo ascendente conector.

c) El radio de atracción R_a del pararrayos (o estructura) es la máxima distancia radial que permite que ocurra un encuentro exitoso entre los dos trazadores (el negativo descendente nube-tierra y el positivo ascendente del pararrayos o de la estructura). ■

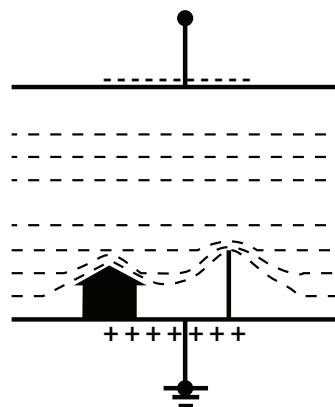


Figura A1.a. Intensificación del campo eléctrico por los cuerpos terrestres. Analogía nube-tierra con un gran capacitor plano.

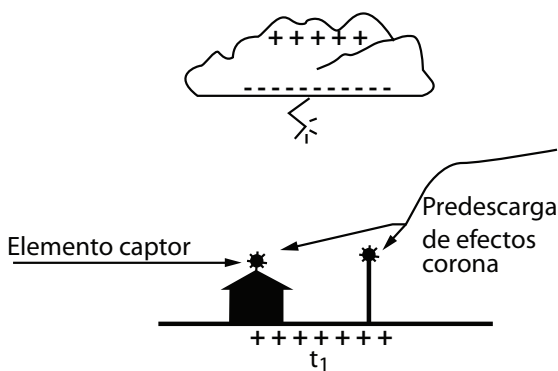


Figura A1.b. Iniciación del trazador descendente (líder de pasos) en la nube tormentosa (instante t_1).

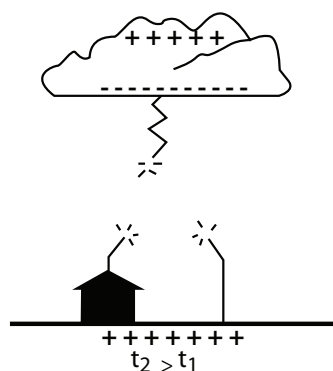


Figura A1.c. Competición de trazadores ascendentes y descendente (instantes $t_2 > t_1$).

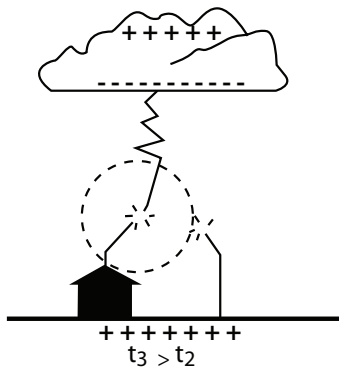


Figura A1.d. Conexión entre líderes descendente y ascendente (instantes $t_3 > t_2$). El rayo cae en el pararrayos.

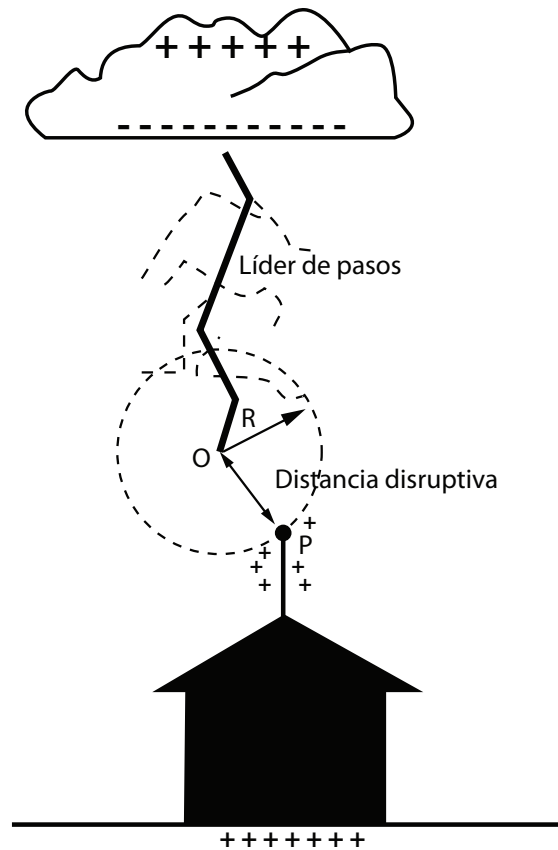


Figura A1.e. Distancia disruptiva
 $D_s = R = 10 \cdot I_p^{2/3}$ (m, kAc).

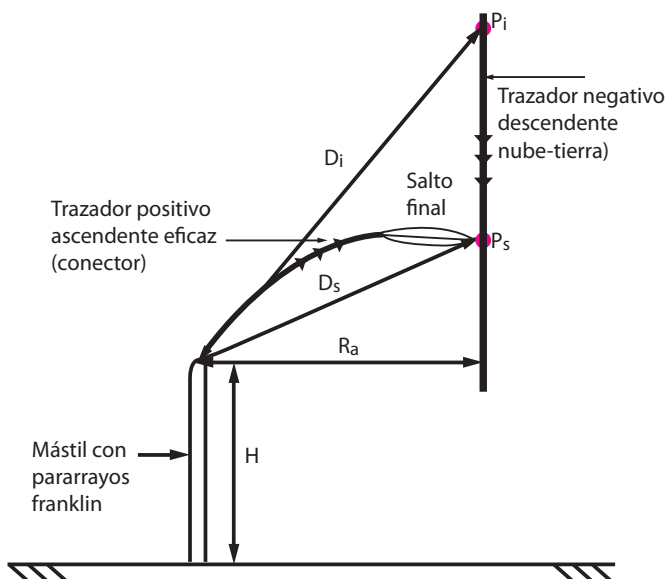


Figura A2. Esquema del proceso de un impacto de un rayo negativo descendente en un pararrayos franklin en un encuentro crítico entre dos trazadores correspondientes al máximo radio de atracción R_a según el modelo de Rizk [12].

Referencias

- [1] Kindermann, Geraldo. *Descargas atmosféricas*, Sagra, Porto Alegre, 1992.
- [2] Horbath, Tibor. "Rolling sphere: Theory and application". Paper 4.8 de 25º ICLP, Rodas, 2009.
- [3] Darveniza, Mat. "A modification to the rolling sphere method for positioning air terminals for lightning protection of building", Paper 10 de 25º ICLP, Rodas, 2009.
- [4] Hartono, Zainal Abidin; Robiah, Ibrahim. "A method of identifying the lightning strike location on a structure" en Conferencia Internacional de Compatibilidad Electromagnética, Kuala Lumpur, 1995.
- [5] Reyna, Ángel. "Terminales captadores de rayos y sus

ángulos de protección: los ángulos de protección de un terminal captor de rayos en función de la altura h a un plano de referencia y del radio R de la esfera rodante”, en *Ingeniería Eléctrica 175*, Editores SRL, Buenos Aires, 2005.

- [6] Arcioni, Juan Carlos. La protección contra rayos de una punta Franklin interpretada según el método de la esfera rodante y un modelo probabilístico de angularidad vertical. (Apostilla: ver capítulos 9, 10 y 11 del trabajo citado en [9]).
- [7] Arcioni, Juan Carlos. “Probables ángulos de caída de rayos a tierra con respecto a la vertical nube-tierra”, en *Ingeniería Eléctrica*, Editores SRL, Buenos Aires, octubre 2003.
- [8] Arcioni, Juan Carlos. “Como caen los rayos a tierra”, en *Ingeniería Eléctrica 147*, Editores SRL, Buenos Aires, julio 2001.
- [9] Arcioni, Juan Carlos. Giménez, Jorge Francisco. “Las esfera rodante” en *Ingeniería Eléctrica*, Editores SRL, Buenos Aires, mayo 2004.
- [10] Svedenik, N. “*Rolling sphere: method or theory*”, en *Journal of Electrostatics* 51-52, Elsevier Science, 2001.
- [11] Rakov, Vladimir. “*Lightning phenomenology and parameters important for lightning protection*”, en IX SPI-DA, Brasil, 2007.
- [12] Rizk, Farouk A. M. “Modelling of lightning exposure of building and massive structures”, IEEE Trans. En Pw. Del. Vol. 24 N° 4, Estados Unidos, octubre 2009.
- [13] Arcioni, Juan Carlos. Giménez, Jorge Francisco. “Breve reseña de los fenómenos físicos de los rayos (física del rayo) y la actuación de los pararrayos”, en *Ingeniería Eléctrica*, Editores SRL, Buenos Aires, octubre 2013.
- [14] Horvath, Tibor. “*Standardization of lightning protection based on physics or the tradition*”, en *Journal of Electrostatics* 60, 2004.
- [15] Arcioni, Juan Carlos. Giménez, Jorge Francisco. “Los mecanismos electrofísicos de impacto de un rayo negativo descendente de una nube tormentosa hacia tierra”, en *Ingeniería Eléctrica*, Editores SRL, Buenos Aires, 2013.
- [16] Briozzo, César. Simon, María. “Pararrayos no convencionales”, en *7º Encuentro de Energía, Potencia, Instrumentación y Medidas* (EPIM), Montevideo, 2008.
- [17] Cooray, Vernon. Rakov, Vladimir. Theethayy, Nelson. “*The lightning striking distance revisited*”, en *Journal of Electrostatics* 65, noviembre 2006.
- [18] Arcioni, Juan Carlos. “Las funciones probabilísticas logaritmo-normales y sus representaciones gráficas: aplicaciones a la ingeniería de la protección contra rayos”, en *Ingeniería Eléctrica*, Editores SRL, Buenos Aires, junio 2004.

Por

Juan Carlos Arcioni, de IRAM,

y Jorge Francisco Giménez, de CITEDEF