

MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE

Ing. Electricista Angel A. Reyna (*)

1 - INTRODUCCIÓN

El método de la esfera rodante, generalmente despierta interés y crea dudas en su aplicación, sobretodo en quienes lo estudian por primera vez. En el presente trabajo se desarrollan los siguientes temas:

- Una breve historia del método
- Conceptos básicos que dan origen al método.
- Relación entre el radio de la esfera rodante y los niveles de protección.
- Confiabilidad del método.
Se analiza sólo con fines didácticos una estructura de sección transversal despreciable en relación a la componente del área colectora correspondiente a su altura h , obteniéndose:
- La función analítica de los valores de cresta de la corriente de retorno en función de la altura “ h ”: $I(h) = f(h)$
- La función analítica de $N_d = f(h, I(h)^{2/3}, N_g)$, siendo N_d la frecuencia esperada de rayos directos a la estructura (rayos /año) y N_g es la densidad de rayos a tierra (rayos /km².año)
- La función analítica de la eficiencia de la protección $E = 1 - f(C, N_c, N_g, h, I(h)^{2/3})$, siendo C una constante y N_c el valor de la frecuencia aceptada de rayos directos sobre la estructura (rayos / año)

2 - BREVE HISTORIA

El método de la esfera rodante sirve para ubicar y dimensionar los elementos captorees en una estructura que se quiere proteger contra las descargas atmosféricas.

Un tratamiento del tema puede verse en las publicaciones [1] [4], [5], [6], [7], [13], y [21]

En la Argentina Dn. Clementino Cabañas Cabañas, de DEHNIBERICA Protecciones Eléctricas S.A., de Madrid, explicó detalladamente el método en sus conferencias en 1 994 [22]

Con la publicación de la norma IRAM 2 184 - 1[3], en 1 996, quedó el método incorporado a la normativa argentina.

Son antecesores de este método, W.H. Peerce, ya citado en la primera parte del trabajo, y A. Schwaiger (**), que empleó el criterio de protección mediante círculos de radios iguales a la altura sobre el suelo del hilo de guardia, de las líneas aéreas de alta tensión [23].

En Hungría en 1962, este método se incorporó en la norma de protección contra rayos (el Prof. T. Horváth de la Universidad Técnica de Budapest, fue el impulsor)

Está incluido también en la norma NFPA 780[5], en Estados Unidos de Norteamérica – país en el que se originó el nombre: “Rolling Sphere Method”.

En Alemania el Dr. Ing. Hasse y el Prof. Dr. Wiesinger comienzan a emplearlo en sus sucesivas publicaciones en la década de los 1 980 y el método forma parte de las normas alemanas actuales.

La designación de esfera rodante en alemán, corresponde a “esfera de rayo” [4].

Lo incorporó la IEC en su norma 1 024-1 en 1 990.

El Código de Práctica inglés BS 6 651 lo ha incluido también

Italia, España y los países europeos al emplear la normativa IEC, automáticamente incorporan el método.

En Francia también se emplea y lo denominan el método de la esfera ficticia.

La nueva norma brasileña NBR 5 419 de 2 001 lo usa para los cuatro niveles de protección y con los radios de la esfera que ha definido el Comité TC 81 de la IEC.

Analizando el método se expresa [2], que la ubicación de los elementos del sistema captoree es adecuada si ningún punto del volumen a proteger está en contacto con la esfera de Radio R, rodando sobre del suelo, alrededor y sobre la parte superior de la estructura, en todas las posibles direcciones. Por lo tanto deberá tocar, solamente el suelo y/o los terminales captorees.

3 -TRAZADORES DESCENDENTES Y ASCENDENTES. PROCESO DE CONEXIÓN. MODELO ELECTROGEOMÉTRICO

La figura A.1- muestra los conceptos básicos del inicio de un rayo típico a tierra (aproximadamente 90 % de los casos). En la figura A.1-a –se muestra la equivalencia aproximada entre el sistema de cargas nube – tierra y un capacitor [16]. 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 escalonada o trazador descendente (fig. A.1-b) se ha originado en la parte de la carga negativa de la nube. En la fig. A.1.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 fig. A.1.d, se ha producido la conexión. En el modelo electrogeométrico a la distancia OP (fig. A.1- e) se la denomina de impacto. La

distancia de impacto d_s se define como la distancia entre el objeto a ser impactado y la punta del líder de pasos, en el instante que la conexión del líder ascendente se inicia.

En [13] el Prof. Duilio Moreira Leite expresa que en el modelo electrogeométrico se supone que el líder descendente se dirige en forma vertical hacia la tierra, no teniendo ramificaciones. También expresa que sólo se consideran las descargas negativas iniciadas en las nubes. En [19] el Prof. Gerardo Kindermann da una curva en cuyo eje de ordenadas figuran los valores de las probabilidades (%) de exceder los valores de los ángulos de inclinación respecto de la vertical del rayo a tierra ($^\circ$), que están representados en el eje de abscisas.

Así por ejemplo existe aproximadamente una probabilidad del 90% de exceder un ángulo de 3° ; una probabilidad del 50% de exceder un ángulo de 22° y una probabilidad del 7% de exceder un ángulo de 60°

En la publicación de **Ingeniería Eléctrica**, de octubre de 2003, [20], el Ing. Arcioni estudia el tema de la “angularidad” vertical de un rayo a tierra, cuantificando las probabilidades en forma muy detallada. La figura 4 de su trabajo es casi coincidente con la curva obtenida por el Prof. Kindermann en [19].

Teniendo en cuenta los conceptos de “angularidad” arriba citados, resulta fácil comprender que hacer rodar la esfera sobre todas las superficies externas de una estructura, tal como se indicó en el punto 2, equivale a considerar cada una de las posibilidades teóricas de descargas que pueden darse.

El proceso continúa con la corriente de descarga denominada de retorno y posteriormente las descargas sucesivas o posteriores (3 ó 4 en promedio)

4 - NIVELES DE PROTECCIÓN Y RADIO DE LA ESFERA RODANTE

La IEC le asigna a la distancia de impacto la siguiente ecuación:

$$\text{Radio de la esfera rodante} = R = 10 I^{2/3} \quad (\text{A.1})$$

siendo I (kA), el valor de cresta de la corriente impulsiva de retorno, que se produce a continuación de la conexión de los líderes descendente y ascendente

Para los cuatro niveles de protección que define la norma IRAM 2 184 -1, le corresponderán los valores de cresta para las corrientes de retorno, indicados en la tabla A.1-

Aplicando la fórmula (A1) para una corriente de cresta de I = 30 kA, la distancia de impacto es de 97 m aproximadamente.

A partir de los datos estadísticos del documento 811/194/CD (norma IEC 62 305 - 1 Ed. 1) se obtuvo la tabla A.1-

Se puede interpretar por ejemplo, que si se aplica el método de la esfera rodante con relación a los niveles de protección I, II, III y IV indicados, para el primer nivel de protección, el 99 % de los valores de cresta probables de las corrientes de retorno de los rayos que impacten sobre la estructura serán superiores a 2,8 kA. Para el segundo nivel de protección, el 97 % de los valores de cresta probables de las corrientes de retorno de los rayos que impacten sobre la estructura serán superiores a 5,2 kA y de este modo se puede seguir razonando en forma análoga para los dos niveles restantes.

Tabla A.1

Nivel de protección	I R = 20 m	II R = 30 m	III R = 45 m	IV R = 60 m
Probabilidades que las corrientes de crestas sean mayores	99%	97%	91%	84 %
<u>a:</u>	2,8 kA	5,2 kA	9,6 kA	14,7 kA

5 - ALGUNAS OBSERVACIONES

El modelo de la esfera rodante, desde el punto de vista teórico no es exacto, dado que si por ejemplo, se considera que mientras se está aplicando el método su superficie contacta el extremo superior de una punta captora y otro punto de la superficie de la esfera, simultáneamente se apoya en una superficie plana, el método asigna la misma probabilidad para que se produzca la conexión de los dos puntos de contactos con el extremo del líder descendente que en este modelo ocupa el centro de la esfera, debido a que no se considera la mayor intensificación del campo eléctrico que se produce en los objetos terrestres terminados en punta o aristas. Este hecho fue expuesto por el Prof. Mat. Darveniza en [7] De acuerdo a lo expresado por este autor el método de la esfera rodante resulta conservativo por el motivo expuesto. Es de decir que se debe interpretar como de mayor seguridad y por lo tanto de mayor costo. La solución propuesta por el Prof. Darveniza es considerar el método de la esfera con su radio correspondiente para todo el edificio a proteger y para superficies planas (techos planos) considera una esfera de radio doble. Esta modificación figura en el Esquema de Revisión (draft) de la norma australiana AS 1 768 [8] En dicho esquema de norma se incorporó el método de la intensificación de campo en el Anexo F, sólo en carácter de informativo. En la parte normativa se aplica el método de la esfera rodante. Este Anexo F establece una prioridad de colocar captores en los lugares que tienen mayor probabilidad de ser impactados.

La publicación [9] da una estadística de edificios dañados por rayos, que se resume en la siguiente tabla A.2-

Tabla A.2- Incidencias de rayos sobre partes de un edificio
(Véase también Fig. A.2-)

Lugar de ubicación	%
Ángulos esquineros sobre techos planos y en el vértice de los terminados en punta y en sus Vértices (puntos A)	> 80
Aristas superiores horizontales (puntos B)	< 10
Aristas verticales (C)	< 5
Superficies planas laterales (punto D)	< 5

En los edificios complejos tales como el presentado en el trabajo [11] (véase la fig. A.3) la aplicación del método de la esfera rodante permitió diseñar y ubicar en forma adecuada los terminales captors, sobre la base de las zonas de protección determinadas por el método de la esfera rodante. En los estudios y tareas para la protección integral contra rayos y sobretensiones de la catedral Marien y la iglesia St. Severi en Erfurt se utilizaron maquetas. Participaron de este proyecto el Dr. Ing. Peter Hasse y el Prof. Dr. Wisienger.

Se han presentado en los últimos congresos y conferencias internacionales (ICLP y SIPDA, por ejemplo) varios trabajos sobre métodos de cálculos de protección contra rayos sobre la base del proceso de intensificación del campo eléctrico.

Existe un método - ideado por Hartono Zainal Abidin y Robiah Ibrahim - de análisis de casos de fallas mediante fotografías tomadas antes y después de los daños ocasionados en edificios de Malaysia. La muy alta actividad cerámica (del orden de 250 días de tormentas anuales) convierte a estos lugares en una especie de “laboratorios naturales”, permitiendo evaluar el comportamiento de distintos tipos de pararrayos y métodos de cálculos de ubicación de terminales captadores. En la publicación [10] pueden verse casos de fallas de los terminales captadores ESE (también denominados activos, de cebado o de gran radio de acción).

Se aprecian casos de fallas de puntas Franklin cuando no es correcta la ubicación de dichos captadores sobre los edificios. Se complementa con la publicación [15]

6 – CONFIABILIDAD DEL MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE

Los puntos más altos de los edificios y estructuras en general, (***) vértices y aristas son lo que ofrecen mayor intensificación del campo eléctrico, siempre son “tocados” por la esfera rodante y por lo tanto ello determina que deban colocarse elementos captadores para la protección contra rayos en esos puntos. Se puede afirmar, en consecuencia, que el método de la esfera rodante resulta muy confiable para establecer los elementos de captación.

Uman y Rakov [6] expresan que el modelo de la esfera rodante está en contradicción con algunos principios físicos, pero permite el desarrollo de técnicas relativamente simples y útiles para diseñar sistemas convencionales de la protección contra el rayo.

Cabe además señalar que el método de la esfera rodante depende de un sólo parámetro, el radio R de la esfera. Este es uno de los motivos que hacen fácil la interpretación del método. Además con ciertos planos con “vistas en corte” de la estructura en consideración, se puede trabajar con circunferencias en lugar de esferas, lo que lo hace más sencillo.

En la fig. A.4 mostrada en la obra [1] representa una maqueta de un edificio a la que se le ha hecho rodar una esfera de radio R, en la escala adecuada para representar el nivel de protección escogido. La esfera impregnada con una especie pintura fresca al rodar dejó las zonas marcadas en un color determinado sobre la maqueta. En estas zonas habría que colocar los elementos captadores.

El proceso de la descarga del rayo es complejo y su descripción completa está fuera del alcance del presente trabajo.

Para estudiar el proceso de unión (attachment process) entre los trazadores descendentes y ascendentes, se recomienda el trabajo [14], desarrollado en el ámbito de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires. La publicación [24] estudia el proceso de conexión a través de los resultados de ensayos realizados en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad de Upsala (Suecia).

Para el modelo de la corriente de retorno puede verse la publicación [17]

7- VALORES DE CRESTA DE LA CORRIENTE DE RETORNO EN FUNCIÓN DE LA ALTURA “h” DE LA PUNTA CAPTORA $I = f(h)$

De ecuación (14) del trabajo principal y de la relación $h/3h$ para el área de colectora equivalente [1], resulta

$$3 h = (2 R h - h^2)^{1/2} \quad (A.2)$$

Elevando al cuadrado ambos miembros de la fórmula (A.2) se obtiene:

$$9 h^2 = 2 R h - h^2$$

Operando resulta:

R = 5 h

(A . 3)

Combinado las ecuaciones (A.3) y (A.1) se obtiene, si se designa con $I(h)$ al valor de cresta I de la corriente de retorno, para el caso $R = 5h$

$$R = 5 h = 10 I(h)^{2/3},$$

$$I(h) = (R/10)^{3/2}$$

$$I(h) = (5 h/10)^{3/2} = (0,5 h)^{3/2}$$

Por lo tanto el valor de cresta de la corriente de retorno $I(h)$, en kA, en función de la altura de la punta captora h (m) resulta:

$$I(h) = (0,5h)^{3/2} \quad (A.4)$$

Se da la representación gráfica de esta función en la fig. A5

8 – FUNCIÓN ANALÍTICA $N_d = f(h, I(h)^{2/3}, N_g)$

El propósito del desarrollo de este apartado es encontrar la función analítica del parámetro N_d (frecuencia esperada de rayos directos a la estructura), mediante una fórmula equivalente a la que dan las normas IEC 61 024-1-1 e IRAM 2184 1-1 de modo que la forma de su estructura interna contribuya a una mejor comprensión para la determinación de los niveles de protección.. de una estructura de sección transversal despreciable respecto del área $9\pi h^2$.

El área colectora, en tal caso será: $A_e = \pi (3 h)^2 = 9\pi h^2 = 9 \pi R R / 25 = 9 \pi 10 I(h)^{2/3} 5 h / 25$
 $A_e = 90 \pi I(h)^{2/3} 5 h / 25 = 450/25 \pi h I(h)^{2/3}$

$$A_e = 18 \pi h I(h)^{2/3} \quad (m^2) \quad (A.5)$$

Conociendo A_e obtenido por la fórmula (A.5) y el parámetro $N_g = 0,04 T^{1,25}$ se puede calcular N_d .

N_g = es la densidad de rayos a tierra dada en rayos a tierra/ km². año

T_d es la cantidad de días de tormentas eléctricas por año.

En la Argentina se puede obtener a partir de los mapas isoceráunicos publicados en el excelente y muy útil trabajo [25], incorporado en la norma IRAM 2184-1-1, como ANEXO Informativo

$$N_d = f(h, I(h)^{2/3}, N_g) = 18 \pi N_g h I(h)^{2/3} 10^{-6} \text{ rayos directos/año} \quad (A.6)$$

Puede decirse que el parámetro N_d , denominado frecuencia de rayos directos a la estructura (la punta Frankiln, en este caso) - es el número promedio anual esperado de rayos directos sobre la estructura – depende según la ecuación (A.6) de los siguientes parámetros: de N_g (rayos a tierra/ km². año) de la altura h (m) y del valor de cresta de la corriente de retorno $I(h)$, en kA, elevada a la potencia de 2/3 y de la constante $18 \pi 10^{-6}$

9 - EFICIENCIA Ó RENDIMIENTO “E” DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

De acuerdo a [1] la eficiencia del sistema del sistema de protección contra rayos (spcr) es

$$E = 1 - N_c / N_d \quad (A.7)$$

Siendo N_c = el valor de la frecuencia aceptada de rayos sobre la estructura (rayos/año).

Relacionado (A.8) con (A.7)

$$E = 1 - f(C, N_c, N_g, h, I(h)^{2/3}) = 1 - N_c 10^6 / (18\pi N_g h I(h)^{2/3}) \quad (A.8)$$

C = constante matemática = 17 683,9

Esta ecuación pone en evidencia que **la eficiencia o rendimiento es función de los parámetros indicados en (A.8)**

10-EJEMPLO

Sea una “torre de comunicaciones”, proyectada mediante una columna monotubular de acero de sección circular, autoportada, a instalar sobre un suelo completamente llano, sin objetos circundantes, inclusive a una distancia superior a $3h$. Por razones técnicas propias del sistema de transmisión la altura de la columna debe tener $h=30$ m, incluida la longitud de una punta Franklin, a instalar en la parte superior. Se ha resuelto por la importancia del equipamiento electrónico, que el local que alojará dicho equipamiento, cerca de la columna, debe ser ubicado en la zona de protección que corresponde al nivel I de protección (según normas IRAM 2 184-1 e IRAM 2 184-1-1). Las dimensiones de este local son $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ y altura de $3,5$ m. El local estará equipotenciado con la columna. Ésta tiene suficiente espesor de sus paredes por lo que no será perforada por los rayos. Por su interior se instalarán los cables coaxiales de las antenas y de energía eléctrica de la baliza. La sección transversal de la columna de acero, por sus pequeñas dimensiones, puede considerarse despreciable, con respecto al área $9\pi h^2$.

Para $h = 30$ m debe tomarse $I(h) = 58$ kA, correspondiendo un $R = d_s = 150$ m

De acuerdo al nivel cerámico de la zona resultó $N_g = 3$ rayos/año km^2 . Aplicando (A5), resultó $N_d = 0.076$ rayos directos /año.

La figura A.6, muestra la esfera de $R = 5h = 150$ m, es la que interviene en el cálculo de N_d .

La esfera de radio $R = 20$ m es la que establece la zona de protección del nivel I, dentro de la cual deberá ubicarse el local de los equipos.

En el ejemplo dado, debido a las dimensiones relativamente pequeñas del local de comunicaciones se puede instalar dicho local en el interior de la zona de protección que da el primer nivel de protección.

11- OTROS ASPECTOS

Una pregunta que se puede hacer es:

¿ Puede la esfera que determina el parámetro N_d tener el mismo radio que la esfera asignada a los niveles de protección?

Si, en los casos indicados en la tabla A.3

Cuando las alturas de las estructuras del tipo que estamos analizando sean menores a los valores indicados, para cada nivel de protección en la tabla A.3, los radios de las esferas para determinar N_d serán menores a los radios de las esferas rodantes respectivos.

Además para que una punta Franklin tenga una utilización de su longitud total como elemento captor, y a su vez tenga una intensificación del campo eléctrico en el nivel de protección considerado, el radio de la esfera de protección R , correspondiente al nivel de protección escogido, debe ser siempre igual o mayor que h ($R \geq h$)

Tabla A.3

Nivel de protección	altura de la punta h (m)	Radio para determinar N_d $R = 5h$ (m)	Radio de la esfera rodante asignada a los niveles de protección (m)
I	4	20	20
II	6	30	30
III	9	45	45
IV	12	60	60

Nota: La aplicación de las fórmulas (A5), (A6 y (A8)) se han presentado solamente con un

fin didáctico para el ejemplo ideal estudiado. En los casos reales se deben emplear las fórmulas dadas por la Norma IRAM 2 184-1-1 y la norma IEC 61 024-1.

12- REFERENCIAS

- [1] Peter Hasse: Overvoltage protection of low voltage systems; 2nd Edition. The Institution Of Electrical Engineers. London 2 000. (Table 4.1.1b. Assignment of angle of protection, rolling sphere radius and mesh size to the protection levels. Page. 78)
- [2] IEC 81/214/ CD (Date of circulation: 2 003 - 03 - 14): Project Number 62 305 - 3 Ed. 1 Protection Against Lightning. Part 3. Physical damage to structures and life hazard. (Table 2: Rolling sphere radius, mesh size and protection angle corresponding to the type of LPS (see 5.2.2); page 24)
- [3] Norma IRA M 2 184-1 Primera Edición 1 996 - 011: Incluye la modificación N° 1 de junio de 2 000: Protección de estructuras contra descargas eléctricas atmosféricas. Parte 1 Principios generales (Tabla 1-: Colocación del dispositivo captor en función del nivel de protección; véase 2.1.2; pág. 18). Norma IRAM 2184-1-1. Primera edición 1 996-11. Protección de estructuras contra descargas eléctricas atmosféricas. Parte 1 Principios generales. Sección I – Guía A: “ Elección de los niveles de protección para los sistemas de protección contra rayos (sper)”
- [4] Peter Hasse: Protección contra sobretensiones de instalaciones de baja tensión. Paraninfo. 1991
- [5] NFPA 780: Standard for the installation of Lightning Protection System. Ed. 2 000
- [6] M. A. Uman and V.A. Rakov: A Critical Review of non Conventional Approaches to Lightning Protection by American Meteorological Society; December 2002 (tomados los conceptos expresados por los autores para sistemas convencionales (pág. 1 809 –1 811)
- [7] Prof. Mat Darveniza: A Modification to the Rolling Sphere Method for Positioning Air Terminals for Lightning protection Buildings. 25th ICLP. Rhodes. Greece 18 -22 September 2 000. Proceedings (páginas 904 - 908).
- [8] Committee EI - 024 DR 2 359 (Projet ID 2 280) Draft for Public Comment Australian/ New Zealand Standard (26/06/2002 - 12/09/2002). Lightning Protection
- [9] Hartono Zainal Abidin, Robiah Ibrahim. A Method of identifying the lightning Strike location on structures. International Conference of Electromagnetic Compatibility. Abril 11-13, 1995. Kuala Lumpur
- [10] Hartono Zainal Abidin and Robiah Ibrahim: A Long Term Study on the Performance of Early Streamer Emission Air Terminals in A High Keraunic Region. Asia Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE 2000). Malaysia; week of July 11, 2003.
- [11] W. Trommer: Lightning Protection for the Marien - Cathedral and the St. Severi Church in Erfurt, Germany. 21st ICLP. Berlin, Germany. September 21- 25, 1 982. Conference Proceedings: 8.10 (pages. 493 - 498)
- [12] T. Horváth. Rolling Sphere - Theory and Applications; 25th ICLP. Rhodes. Greece September 18- 22, 2 000. Conference Proceedings: 4.8 (pages. 301 - 305)
- [13] Duilio Moreira Leite y Carlos Moreira Leite: Proteção Contra Descargas Atmosféricas. Oficina de Mydia. 1 997
- [14] Héctor Soibelzon, Juan C. Arcioni, Adrián Kisielesky, L. Fabiana Ferreira: First Stage of Lightning Discharges, Streamer and Leader. VI International Symposium on Lightning Protection. 18 - 23 November 2001. Santos. Brasil
Proceedings págs. (45 -50)
- [15] Z.A. Hartono, I. Robiah and M. Darveniza: A Database of Lightning Damage Caused by bypasses of air-terminals on buildings in Kuala Lumpur, Malaysia. VI International Symposium on Lightning Protection. 18th - 23th November 2 001. Santos. Brasil Proceedings pág. 211 - 215)
- [16] Pierre Gruet. Etudes des Paratonnerres a Dispositif d'amorcage. INERIS
- [17] F. Rachides, V. A. Rakov, C.A. Nucci, and J.L. Bermudez: Effect of vertically extended strike object on the distribution of current along the lightning Channel. Journal of Geophysical Research, Vol.10, N° D23, 4 699, doi: 10.1029/2 002 (16-1 a 16-6).
- [19] Prof. Gerardo Kindermann. Descargas atmosféricas. Sagra Luzzatto. Porto Alegre. 1997
- [20] Juan Carlos Arcioni. Probables ángulos de caídas de rayos a tierra respecto de la vertical nube – tierra. Ingeniería Eléctrica. Octubre 2003
- [21] Hasse / Wiesinger: EMV - Blitz - Schutzzonen-Konzept Pflaum Verlag München- VDE -Verlag Berlin - Offenbach, 1 993 (Seite 108-115)
- [22] Clementino Cabañas Cabañas: Protección Integral contra rayos y sobretensiones. Serie de Conferencias en la Argentina. Edición AEA, 1 994
- [23] Dipl. Ing Prof. Pedro Marcellic Líneas y Redes Eléctricas Ediar Soc. Anón. Editores Buenos Aires, 1 957.
- [24] Mose Akyus, Vernon Cooray. The Franklin Lightning Conductor: Conditions necessary for the initiation of a connecting leader. Journal of Electrostatic 51 -52 (2 001); pp 319-325.
- [25] J.C. Arcioni, R.Velo, E. Petruzzelli: “La actividad eléctrica atmosférica en la Argentina y su relación con la densidad de rayos a tierra”. 7^a C.E.D.E. (1997), Asociación Electrotécnica Argentina (AEA), 1990.

(*) **Ingeniero Electricista. Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas de la Universidad Nacional de La Plata**

(* *) Schwaiger, A.: Profesor universitario, primero en Karlsruhe; posteriormente en Munich, autor de la obra: Der Schutzbereich von Blitzableitern. Neue Regeln für den Bau von Blitz - Fangvorrichtungen. München, Oldenburg 1 938. 115 S. Brosch. 22x14 cm. (Versandstufe 1). Zustand II/III, Ebd. leicht fleck., Buchrück. etw. beschädigt. -- (Inkl. 7% MwSt.). Technik: Technik allgemein. Buch-Nr. des Händlers

(***) Hace unos 2300 años Artabanis, consejero de Xerxes, rey de Persia, le dio recomendaciones a este rey para atacar a los griegos: "Haga como Dios con su rayo, que siempre golpe a los más grandes animales y no le importan los pequeños. También sus rayos caen sobre las casas y árboles más altos. No se meta con las bestias".

En su poema De Rerum Natura, publicado en el año 55 a.C., Tito Caro Lucrecio escribió acerca de los rayos: "¿Por qué le tiene (Júpiter) un cariño especial a los altos lugares, de modo que veamos la mayoría de los rastros de su fuego en la cima de la montaña?" y "¿Por qué él demuele los lugares santos de los dioses y de sus propios domicilios espléndidos (que fueron situados en altos lugares) con un poder devastador?". Tito Lucrecio Caro fue un poeta y filósofo romano del siglo I (a. C.), contemporáneo de Julio César y Cicerón. Fue un seguidor de Epicuro y de los atomistas griegos y en su poema De Rerum Natura (Sobre la naturaleza de las cosas; 6 tomos) expuso una visión mecánica del universo. Aunque el interés de Lucrecio no era el problema físico, sino la exposición de una filosofía determinada, en su obra hace una descripción de la naturaleza y expone sus teorías sobre el comportamiento de la materia: el viento, el calor, el frío, el fuego, el color de las cosas, los truenos, los rayos, los volcanes, etc. Brevemente, para Lucrecio, toda la Naturaleza se compone de dos cosas: "... los cuerpos y el vacío en el que éstos están situados y en cuyo seno se mueven...". Siguiendo las ideas de Demócrito, Lucrecio sostuvo, además, que todos los cuerpos estaban formados por átomos, de forma tal que todo el universo estaría formado exclusivamente por átomos y espacio vacío, y así "las cosas no pueden surgir de la nada y, si han surgido, no pueden volver a la nada".

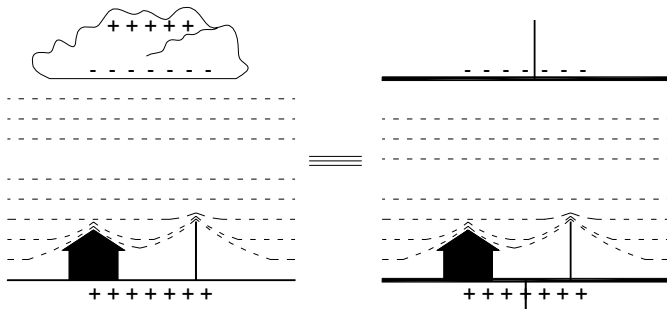


Fig. A.1.a - Intensificación del campo eléctrico por los cuerpos terrestres. Analogía nube-tierra con un gran capacitor.

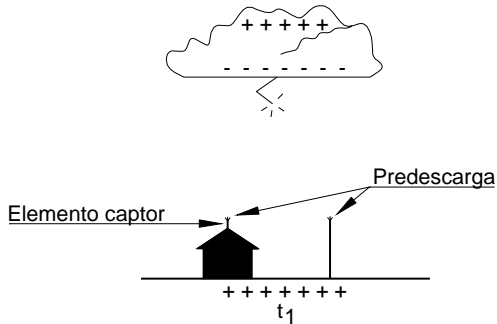


Fig. A.1.b - Iniciación del trazador descendente (líder de pasos).

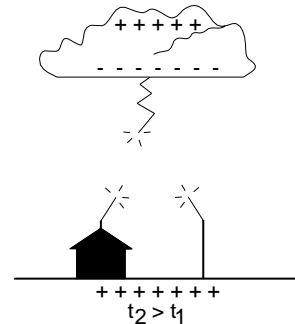


Fig. A.1.c - Competición de trazadores ascendentes.

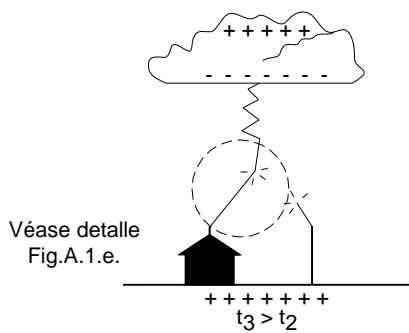


Fig. A.1.d - Conexión entre líderes descendente y ascendente.

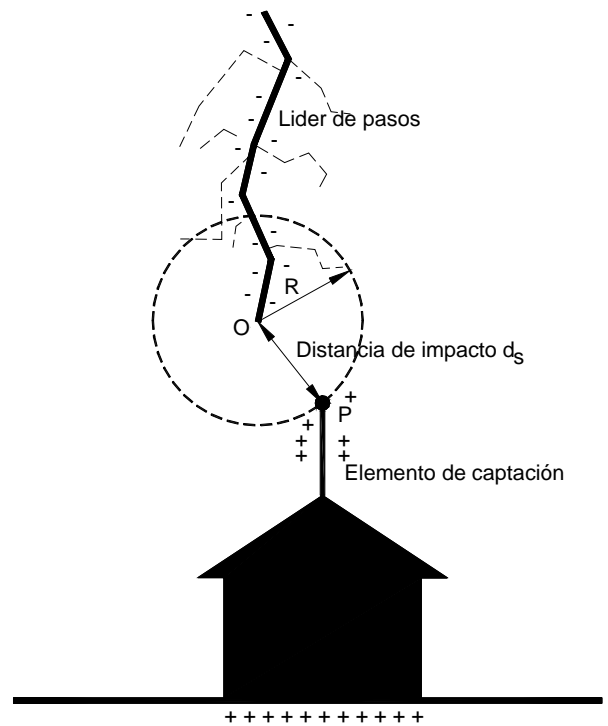


Fig. A.1.e - Distancia de impacto $d_s = R = 10 |I|^{2/3}$

NOTA: En el modelo electrogeométrico el líder descendente debe considerarse vertical y sin ramificaciones /13/

Fig. A1 - Proceso de Descarga de un rayo a tierra. (carga Negativa en la nube) Adaptado de /16/

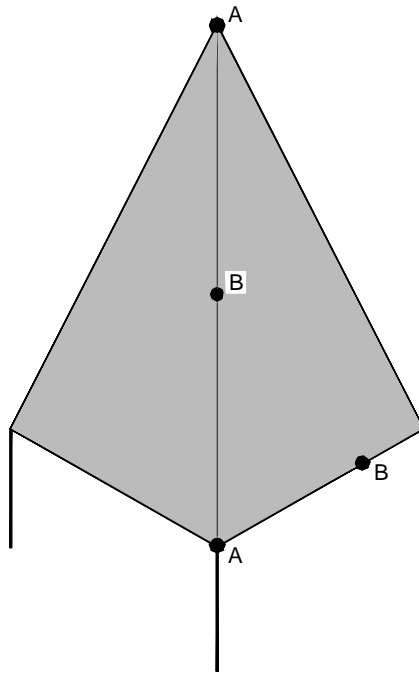
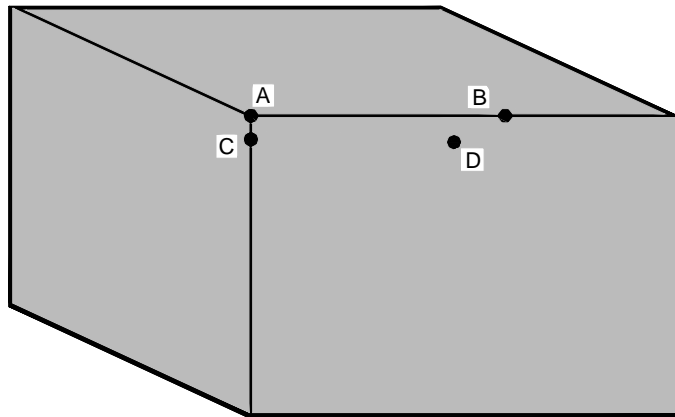


Fig. A.2 - Puntos de mayores porcentajes de impactos de rayos. De [9]

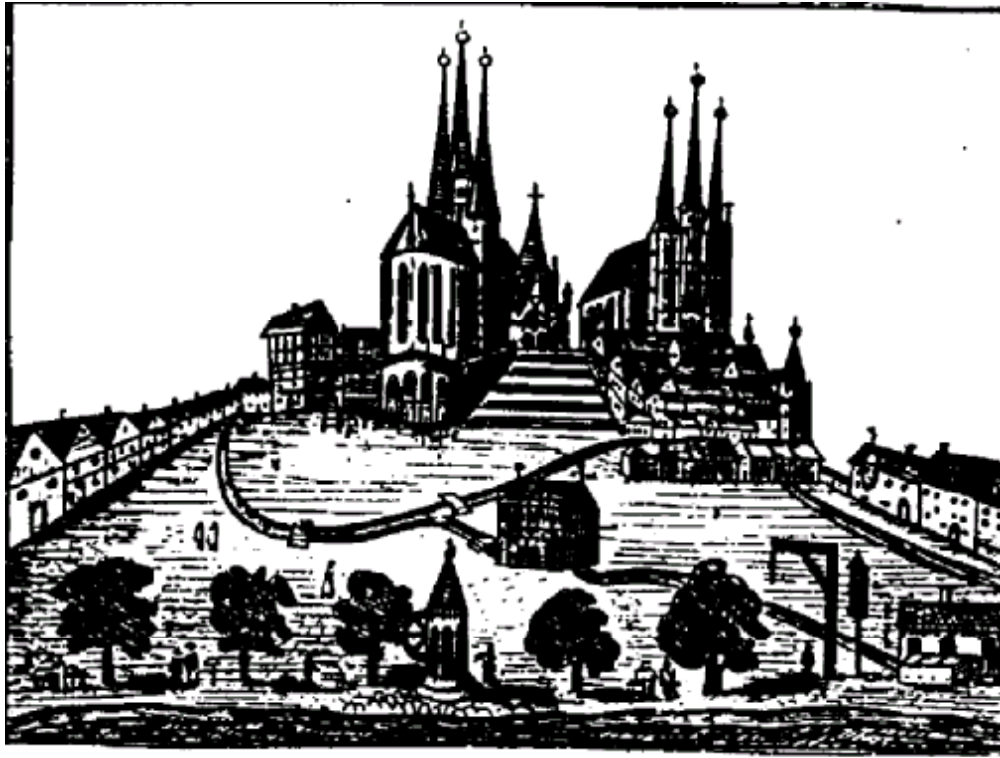


Fig. A.3- Catedral Marien e Iglesia de St. Severi en Erfurt (Alemania)

Fig. A4 - Aplicación del método de la esfera rodante. Maqueta de un edificio y esfera en escala

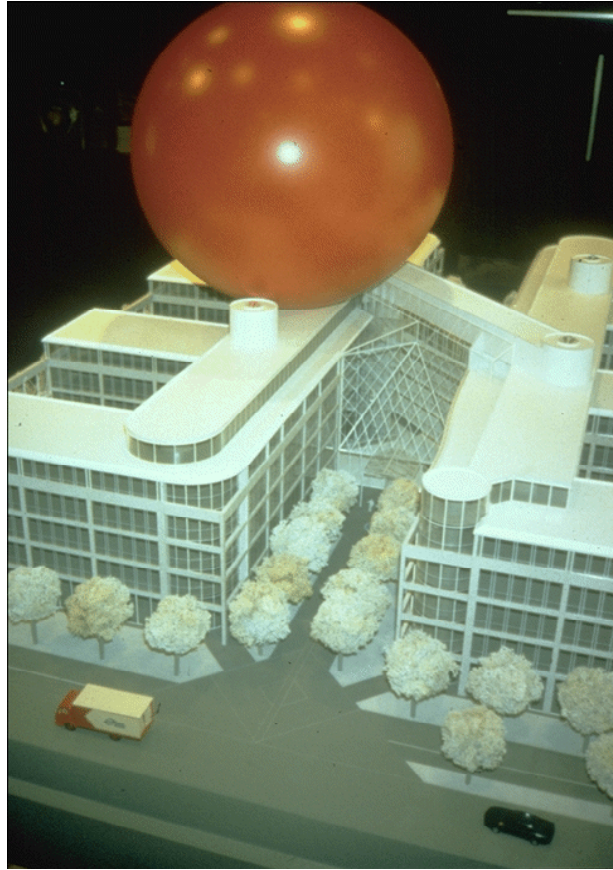


Fig. 4 a – Comienzo de la verificación

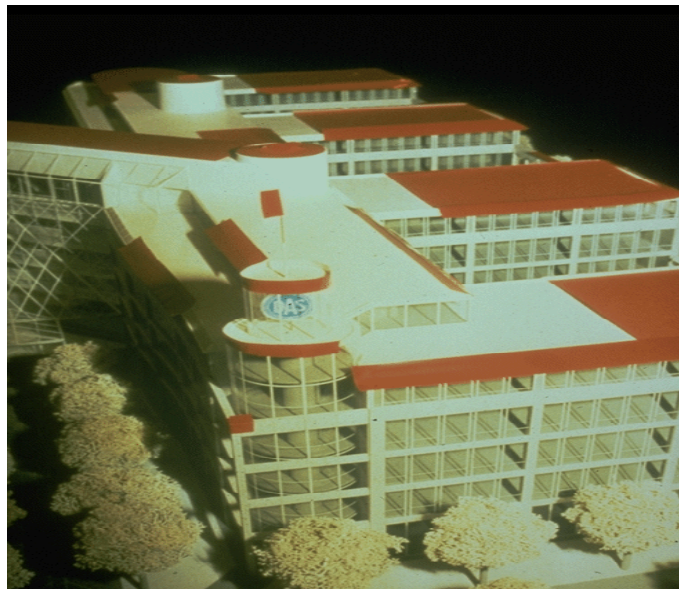
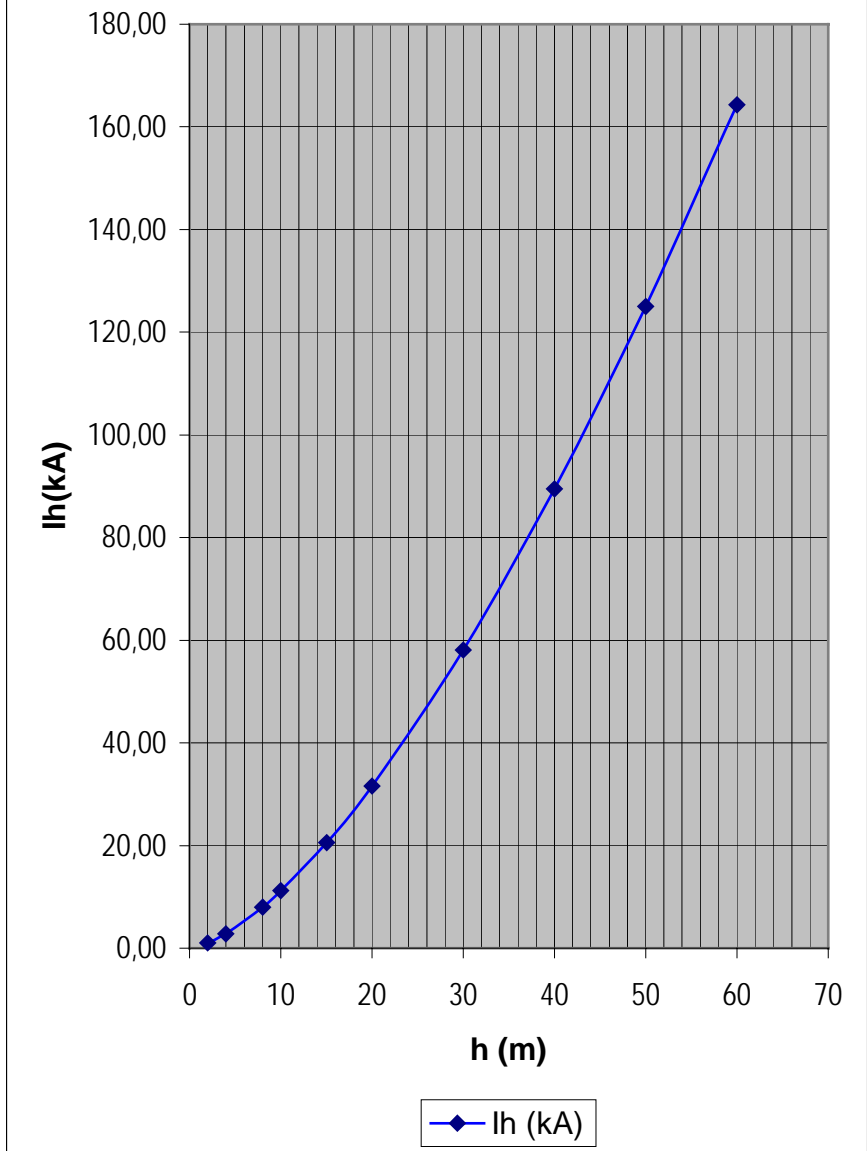


Fig. A.4 b - Vista en la que se aprecian las zonas pintadas, en los que hay que colocar elementos de captación

Fig. A.5 - I_h (kA) = f (h)



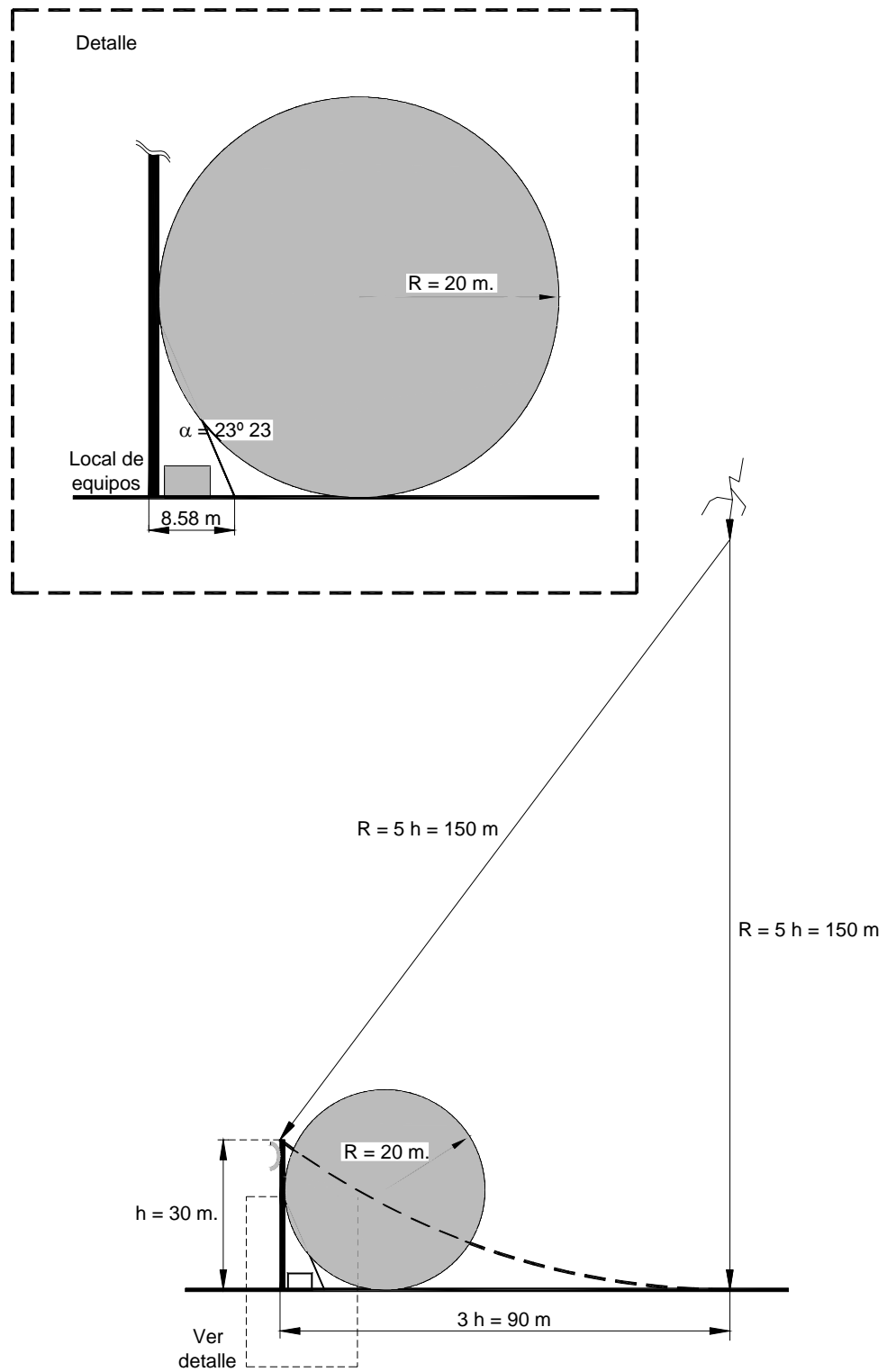


Fig. A.6 Ejemplo de protección externa de un local de comunicaciones (nivel I).
Cálculo de N_d