

# 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”

La función continua analítica  $\alpha = f(h, R)$

Por el Ing. electricista Angel A. Reyna (\*)

Al genial inventor de la eterna y enigmática “punta” Franklin (\*\*)

## I - INTRODUCCION

Un grupo de ingenieros y técnicos argentinos está participando en el Comité Técnico CT 81 CEA (Comité Electrotécnico Argentino), “Protección Contra las Descargas Atmosféricas”, en la elaboración de normas IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) que tiene a cargo el *Technical Committee TC 81 “Lightning Protection”*, con sede en Ginebra (Suiza). El Prof. Ing. Juan Carlos Arcioni ocupa la Presidencia del CT 81 del CEA y el autor de este trabajo preside la Secretaría. La IEC pone en circulación entre determinadas fechas esquemas (“drafts”) de normas, para ser considerados por los Comités de los distintos países asociados (más de 50).

Este Comité CT 81 cuenta con 12 ponencias presentadas sobre un total de 14, aprobadas por la IEC. Dentro de este modo de trabajo se está analizando el documento especificado en [2]. Se decidió publicar el análisis que dio origen a la búsqueda de la relación entre zonas de protección determinadas por el método de la esfera rodante y entre zonas de protección dadas por los ángulos de protección para un mismo elemento captor.

El objetivo fundamental, se puede resumir en los siguientes puntos:

- Incorporar a las normas la ecuación (17) para facilitar el cálculo automático en los programas (software) y en las planillas de cálculos en computadoras;
- Aplicar la ecuación (14) para determinar si la esfera rodante tiene un punto de tangencia sobre el “plano físico” de referencia en consideración. En caso afirmativo, se pueden aplicar las curvas o la ecuación (17). De lo contrario, se debería establecer que el método que se aplicará es el de la esfera rodante.

El desarrollo del trabajo se ha ampliado a otros temas relacionados, solamente con fines didácticos, sin ningún propósito de propuesta de normalización.

Además, se ha agregado un ANEXO sobre el método de la esfera rodante y algunos datos históricos

## II – ANÁLISIS PREVIO

Comparando la tabla 2 del documento IEC indicado en [2] con la tabla 1 de las normas IEC 61024-1- Ed. 1 e IRAM 2184 -1 [3], se observa que existen algunas diferencias en los valores de los ángulos de protección de las puntas captoras verticales.

En [1], [2] y [7] hay gráficos que contienen curvas continuas de los ángulos  $\alpha$  de protección en función de la altura  $h$ , que completan los valores discretos dados en la tabla 1 de las normas IEC 61024 - 1. Ed.1 e IRAM 2184 -1, antes citadas. La primera pregunta que surge es: ¿A qué puede atribuirse este cambio? Para conocer la posible causa hay que buscar algún criterio que relacione las zonas de protección que dan los métodos de la esfera rodante y de los ángulos de protección de la punta captora.

La segunda pregunta que se puede plantear es: ¿Por qué no encontrar esa función también en forma de ecuación matemática, como complemento de las curvas gráficas dadas para la futura norma 62305 –1 Ed. 1 [2]?

Desde hace algunos años ha sido preocupación del autor el análisis de la aplicación de los métodos de la esfera rodante y de los ángulos de protección en los bordes de terrazas o techos planos.

## III - DESARROLLO MATEMÁTICO - ANALÍTICO

La hipótesis probada para resolver la primera pregunta no dio los resultados esperados. Se trata del método de la tangente, empleado para resolver un ejemplo en la obra [20]. Ello se debe a que, tomando como valores verdaderos los correspondientes a los ángulos obtenidos de las curvas de la IEC, tabla 2, [2], con respecto a los que se obtienen con el método de la tangente (ecuación:  $\phi = \arccos(1 - h/R)$ , página 110 de la obra [20] ), se producen en promedio errores relativos del 47%, con un punto extremo, y error del 100% (si bien del lado de la seguridad). El método de la tangente, por lo tanto, no cumple con

los objetivos trazados en este trabajo). Además, es incompatible con la equivalencia a un volumen de protección nulo de la esfera rodante para  $h/R = 1$ . En realidad, el método de la esfera rodante da un volumen de protección en todos los puntos de la esfera rodante que cumplen esa condición. Recuérdese que en la norma IEC 61 024 -1 1ª Edición, la tabla 1 indica para todos los niveles de protección correspondientes a la relación  $R/h = 1$ , un ángulo de protección de  $25^\circ$ .

Resultó finalmente satisfactorio el criterio de la igualdad de las áreas de las dos zonas de protección, dadas por la esfera y la punta captora, de acuerdo con el significado y desarrollo siguientes:

Considerando la Fig.1, se debe hallar la superficie debajo del arco  $P(x_h, y_h)$  y  $P(0,0)$  y se debe igualar a la superficie del triángulo  $P(x_h, y_h)$ ,  $P(x_h - x_1, 0)$  y  $P(x_h, 0)$ , cuyo valor es igual a  $(x_1 h / 2)$ . Se deberá encontrar la ecuación del ángulo de protección  $\alpha$ , en función de la igualdad de áreas planteada. Esto conduce a realizar una integración matemática..

Para realizar dicho proceso de integración matemática de forma más simple, se parte de la Fig.2, con el captor invertido y con el eje de abscisas pasando por O.

La ecuación del arco de  $90^\circ$  superior derecho de la circunferencia es  $y = +(R^2 - x^2)^{1/2}$

En la Fig.2 observé que la zona de protección que da la punta Franklin, aplicando el método de la esfera rodante, está limitado por el arco de circunferencia entre los puntos  $P(0,R)$  y  $P(x_h, y_h)$ , por el segmento entre los puntos  $P(0,R)$  y  $P(x_h, R)$  y por el segmento entre los puntos  $P(x, R-h)$  y  $P(x_h, R)$  Se aprecia, también, que la superficie de la zona de protección descrita estará dada por la resta de las superficies siguientes:

(Superficie del rectángulo  $0, P(x_h, 0), P(x_h, R), P(0,R)$ ) - (Superficie del arco de circunferencia entre rectas  $x = 0$  y  $x = x_h$ .)

Por lo tanto, la superficie que tiene la zona de protección que da la esfera de radio R es

$$S_p = x_h R - \int_0^{x_h} (R^2 - x^2)^{1/2} dx \quad (1)$$

Para calcular la integral se supone que es:

$$x = R \operatorname{sen} u \quad (2)$$

El significado dado a esta variable auxiliar ha sido muy claramente explicado por la egregia Profesora Emérita de la Universidad de Buenos Aires, Doctora Celina Haydeé Repetto, en [5]

Por lo tanto:

$$x^2 = R^2 \operatorname{sen}^2 u; \quad dx = R \cos u \, du$$

Reemplazando en (1)

$$S_p = x_h R - \int_0^{x_h} (R^2 - x^2)^{1/2} dx = x_h R - \int_0^{x_h} (R^2 - R^2 \operatorname{sen}^2 u)^{1/2} (R \cos u) du$$

$$S_p = x_h R - \int_0^{x_h} [R^2 (1 - \operatorname{sen}^2 u)]^{1/2} (R \cos u) du$$

$$S_p = x_h R - \int_0^{x_h} (R \cos u) (R \cos u) du$$

$$S_p = x_h R - R^2 \int_0^{x_h} (\cos^2 u) du \quad (3)$$

Recuerdo a mi ex Profesor de Análisis Matemático I, Dr. César Trejo, cuando en el pizarrón del aula Numa Tapia de la Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas de la Universidad de La Plata, para resolver la integral del coseno cuadrado y del

seno cuadrado, escribía las dos ecuaciones siguientes:

$$\cos^2 u + \sin^2 u = 1 \quad (4)$$

$$\cos^2 u - \sin^2 u = \cos 2u \quad (5) \quad \text{Sumando miembro a miembro, resulta:}$$

$$2 \cos^2 u + 0 = 1 + \cos 2u$$

Resulta finalmente:

$$\cos^2 u = 0,5 (1 + \cos 2u) \quad (6)$$

Reemplazando (6) en (2)

$$S_p = x_h R - 0,5 R^2 \int_0^{x_h} (1 + \cos 2u) du$$

$$S_p = x_h R - \left\{ 0,5 R^2 u + 0,25 R^2 \int_0^{x_h} \cos(2u) d(2u) \right\}$$

$$S_p = x_h R - \left\{ 0,5 R^2 u + 0,25 R^2 [\sin(2u)] \right\}_0^{x_h} \quad (7)$$

Recordando de la ec. (2) que es:

$$x = R \sin u$$

por lo tanto  $\sin u = x / R$  (8) y entonces debe ser:

$$u = \arcsin(x/R) \quad (9)$$

Por otra parte:

$$\sin(2u) = 2 \sin u \cos u = 2 \sin u (1 - \sin^2 u)^{1/2} = 2(x/R)[1 - (x/R)^2]^{1/2}$$

Por lo tanto

$$\sin(2u) = (2x/R^2) [(R^2 - x^2)^{1/2}] \quad (10)$$

Reemplazando (9) y (10) en (7) y simplificando, resulta que:

$$S_p = x_h R - \left\{ 0,5 R^2 \arcsin(x/R) + 0,5 x (R^2 - x^2)^{1/2} \right\}_0^{x_h} \quad (11)$$

$$\text{Siendo: } x = (R^2 - y^2)^{1/2} \quad (12)$$

$$\text{y de la Fig.2 } R = h + y, \text{ resulta } y^2 = (R - h)^2 = R^2 - 2hR + h^2 \quad (13)$$

Reemplazando (13) en (12)

$$\boxed{x_h = \sqrt{(2hR - h^2)}} \quad (14)$$

Reemplazando (14) en (11)

$$S_p = R (2hR - h^2)^{1/2} - 0,5 R^2 \arcsin \left\{ (2hR - h^2)^{1/2} / R \right\} - 0,5 (2hR - h^2)^{1/2} (R^2 - [(2hR - h^2)^{1/2}]^2)^{1/2} \quad (15)$$

Por la igualdad de áreas planteada  $S_p = h x_1 / 2$ ;  $x_1 = S_p / 2h$  y  $\text{tg } \alpha = x_1 / h = S_p / 2h^2$

$$\alpha (\text{°}) = (180/\pi) \arctg \left[ \left[ (1/(2h^2)) \right] \left\{ R (2hR - h^2)^{1/2} - 0,5 R^2 \arcsin \left\{ (2hR - h^2)^{1/2} / R \right\} - 0,5 (2hR - h^2)^{1/2} (R^2 - [(2hR - h^2)^{1/2}]^2) \right\} \right] \quad (16)$$

Simplificando, resulta la función analítica continua buscada  $\alpha = f(h; R)$ , cuya forma explícita es la siguiente ecuación de dos variables (h y R):

$$\alpha (^{\circ}) = 180 / \pi ) \operatorname{arctg} \left[ \frac{(R + h) (\sqrt{2Rh - h^2}) - R^2 \operatorname{arcsen} \left( \frac{\sqrt{2Rh - h^2}}{R} \right)}{h^2} \right]$$

(17)

En una planilla de cálculo Excel®, se obtuvieron con esta ecuación una gran cantidad de puntos, que permitieron la representación gráfica de la función  $\alpha (^{\circ}) = f(h; R)$  teniendo a  $R \geq h_{\max}$  como parámetro (véase la Fig. 4)

La ecuación de la recta inclinada que forma el ángulo de protección es:

$$y = mx + b \quad (18)$$

siendo m el coeficiente angular o pendiente y b la ordenada de la recta para  $x = 0$ .

$$m = -1 / \operatorname{tg} \alpha \quad (19)$$

$$b = R + [(2Rh - h^2)^{1/2} - h \operatorname{tg} \alpha] / \operatorname{tg} \alpha \quad (20)$$

El punto de intersección de esta recta con la circunferencia de Radio R, se obtiene resolviendo una ecuación cuadrática:

$$Ax^2 + Bx + C = 0 \quad (21) \text{ siendo:}$$

$$A=1 \quad (22)$$

$$B = 2 b m / (1 + m^2) \quad (23), \text{ y}$$

$$C = (b^2 - R^2) / (1 + m^2) \quad (24)$$

Se denomina  $x_{\text{int}}$  a la abscisa del punto de intersección de la recta de la ecuación (18) con la circunferencia de radio R:

$$x_{\text{int}} = -B/2 - 0,5 (B^2 - 4 A C)^{1/2} \quad (25)$$

La ordenada  $h_{\text{int}}$  se puede obtener de la ecuación (18). A esta ordenada la podemos relacionar con la altura h de la punta captora:

$$h_{\text{int}} (\%) = 100 (h_{\text{int}} / h) \quad (26)$$

Con este valor se podrá conocer hasta qué altura desde el plano de referencia, no afecta el efecto de la linealidad, que se obtiene aplicando el criterio del ángulo de protección respecto de la curva obtenida de la ecuación de la circunferencia de radio R.

En caso de que la esfera rodante no pueda tener un punto de tangencia, por falta de espacio suficiente en el plano de referencia, por ejemplo en una superficie plana horizontal de un techo de un edificio, se puede hallar una función analítica a partir de la ecuación (11) y la Fig.3 a. Se han realizado las modificaciones necesarias, quedando una ecuación intermedia- de más fácil interpretación y manejo:

$$\alpha_1 (^{\circ}) = (180/\pi) \operatorname{arctg} \{ (2/h^2) (x_h (y_h + h) - (1/2)[R^2 \operatorname{arcsen} (b/R) - R^2 \operatorname{arcsen} (a/R)] + (1/2 [ b \sqrt{(R^2 - b^2)} - a \sqrt{R^2 - a^2} ])\}$$

(27)

Los parámetros que figuran en la ecuación (27) tienen el siguiente significado:

h: altura punta Franklin, en m

b: es el valor de la abscisa desde el eje y a la base de la punta Franklin., en m

$x_h$ : distancia desde el borde del techo, en contacto con la esfera de radio R y la base de la punta

Franklin, en m.  
$$y_h = (R^2 - x_h^2)^{1/2} \quad (28)$$

$$b = [(R^2 - (x_h^2 + h^2)/4)^{1/2}] \cos \arctg(xh/h) + 0,5((x_h^2 + h^2)^{1/2}/2) \operatorname{sen} \arctg(xh/h), \quad \text{en m} \quad (29)$$

$$a : b - x_h, \quad \text{en m} \quad (30)$$

R: Radio de la esfera rodante, en m

El campo de aplicación, tomando un eje x auxiliar al que se le asigna el origen en el punto donde se apoya la esfera rodante, en la figura 3a, es:

$$x_{h \min} \leq x \leq (2Rh - h^2)^{1/2} \quad (31)$$

$$\text{siendo } x_{h \min} = R - (R^2 - h^2)^{1/2} \quad (\text{ Véase fig. 3 b}) \quad (32)$$

#### **IV – EJEMPLO DE APLICACIÓN**

Sea una estructura aislada, circular de radio  $r = 20$  m, totalmente metálica. La altura de la estructura es de 30 m. Presenta una terraza plana en la que hay varios equipos eléctricos. En el centro de la terraza hay una columna metálica autoportante de  $h = 25$  m, incluyendo la punta captora superior colocada. El nivel de protección adoptado es el tercer nivel de protección, correspondiente a un radio de la esfera rodante  $R = 45$  m. Calcular el ángulo de protección que se logra.

Leyendo directamente los valores en la tabla 2 de la IEC [2] el ángulo de protección de  $43^\circ$  Haciendo  $h \operatorname{tg} \alpha = 25 \operatorname{tg} 43^\circ = 23,31$  m, mayor que  $r = 20$  m. Si, a continuación se analiza el problema desde el punto de vista del trabajo desarrollado, se debe calcular por (14)  $x_h = \sqrt{(2hR - h^2)}$ . Resultó  $x_h = 40,31$  m, mayor que  $r = 20$  m. Por lo tanto, se debe aplicar la ecuación (27), dando un ángulo de protección  $\alpha_1 = 30^\circ$ . El valor absoluto del error relativo cometido por aplicar el método de la IEC, respecto del método desarrollado en la presente publicación =  $|(30 - 43)/30| = 39\%$  (Véase Fig. 5)

#### **V -CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

1º) Se ha logrado la función analítica buscada, ecuación (17), que es matemáticamente válida en el intervalo:

$2 \text{ m} \leq h \text{ (m)} \leq R \text{ (m)}$ , siendo  $R =$  radio de la esfera rodante, correspondiente al nivel de protección seleccionado según el TC 81 de la IEC.

Para las alturas  $h \leq 2$  m, es decir:

$0 < h \text{ (m)} < 2$  m, se tomará el valor que tiene la función  $\alpha \text{ (}^\circ\text{)} = f(h; R)$  para  $h = 2$  m, correspondiente al nivel de protección que se está considerando, según el criterio fijado por las normas IEC.

2º) Se dispondrá de una “herramienta de cálculo” aplicable a programas de computación y empleo en “planillas de cálculo”, etc.

3º) Se ha demostrado matemáticamente que las curvas dadas por la tabla 2 de la norma IEC[2], para un determinado nivel de protección, que dan los ángulos de protección; no se pueden emplear en forma independiente sin tener en cuenta la ecuación (14). Si ello así ocurriera, podrían cometerse errores apreciables, tal cual como se ha demostrado en el ejemplo desarrollado.

4º) En la Fig.6 se toma una punta captora, de altura h, para un determinado nivel de protección (ejemplo I), con  $h = 15$  m, comprendida en el intervalo de definición de las funciones del ángulo. La recta vertical  $h = 15$  m intercepta a las curvas  $\alpha^\circ = f(h, R)$  desde el nivel de protección I hasta el nivel IV, en cuatro puntos distintos. Se obtienen ángulos de protección de la  $\alpha_i^\circ$  ( para  $i = I, II, III$  y IV) y con éstos se ha elaborado la Fig.6. Así, puede verse que una zona de protección a la que se le asigna el nivel IV, se compone realmente de cuatro zonas componentes, una de cada nivel, para este caso. Hay, por lo tanto, una disminución del grado de protección en la medida en que el objeto que se protegerá se aleja de la punta Franklin.

5º) El método del ángulo de protección goza de la predilección de muchos técnicos para resolver casos sencillos de protección contra rayos. La nueva normativa del TC 81 recomienda la aplicación en instalaciones simples.

- 6°) En la fig. 7; se pueden observar, para un mismo nivel de protección (III, en este caso), las zonas de protección equivalentes en superficie, dibujadas en las proporciones reales, para tres alturas distintas de la punta captora ( $h = 15 \text{ m}$ ,  $h = 30 \text{ m}$  y  $h = 45 \text{ m}$ ).
- 7°) La ecuación (14)  $x_h = \sqrt{(2 h R - h^2)}$ , resulta de suma utilidad para la resolución de casos prácticos. Esta ecuación también indica que para obtener un “cono de protección” con la punta captora la superficie mínima del plano de referencia será la de un círculo de radio  $x_h$ . Esta conclusión está en concordancia con [4] (página 9 y Fig. 1), con [23] (capítulo 5), con [8] y con [10]
- 8°) En la Fig. 8 se muestra un ejemplo, en el que una punta Franklin, según la ubicación que tenga sobre el techo plano de un edificio, da ángulos distintos de protección, disminuyendo sensiblemente hacia los bordes exteriores hasta hacerse nulo. Esta situación no es detectada con las curvas dadas por la IEC, aplicándolas en forma independiente. Al estudiar la estructura interna de la fórmula (17), se observa que cada radical contiene la distancia entre la punta vertical captora y el punto de tangencia de la esfera sobre el plano de referencia (fórmula 14). A medida que la punta se aproxima a los bordes del techo, va disminuyendo el ángulo de protección exterior, al no poder tener la esfera un punto de tangencia en la superficie interior del techo, sino sólo apoyarse sobre una arista o vértice del techo y en el extremo superior de la punta captora.
- 9°) Desde el punto de vista teórico, puede afirmarse que la punta Franklin de altura  $h$  no tiene límites de aplicación si se asocia a la esfera rodante correspondiente, con los límites asignados en el presente trabajo. Para la determinación de los valores de los ángulos de protección, se **deben tener en cuenta los planos y puntos de referencia correspondientes**. Si la esfera rodante ubicada sobre un plano referencia da una zona de protección, también la dará la punta Franklin asociada, con respecto a dicho plano de referencia. No obstante, se reitera que la aplicación del método del ángulo de protección debe limitarse a estructuras sencillas. También pueden instalarse las puntas Franklin en los puntos de mayor intensificación del campo eléctrico, como por ejemplo, vértices esquineros y partes más altas de los edificios, como complemento, por ejemplo, a un sistema de malla captora, proyectado de acuerdo con las normas IEC 61 024 –1 e IRAM 2 184 -1. Este último modo de proceder ha sido el que ha usado el autor en muchos proyectos de sistemas de protección contra rayos. La combinación de mallas captoras compuestas por conductores de sección circular sobre los techos o terrazas, con un anillo exterior perimetral de la estructura y puntas Franklin en los puntos señalados permiten captar, subdividir las corrientes del rayo directo y atenuar las pendientes de las componentes de las ondas impulsivas del rayo y, de ese modo, afectar en mucho menor grado a los elementos electrónicos que pudieren estar instalados dentro de los edificios en consideración.
- 10°) Un ejemplo de aplicación del método de los ángulos de protección al espacio interior entre dos puntas Franklin se bosqueja en la Fig. 9. Para la obtención de los valores de los ángulos de protección, se supuso la validez del criterio de la igualdad de áreas, haciendo uso para este caso, de herramientas matemáticas tales como el Teorema de Rolle (\*\*\*) y el teorema del valor medio del cálculo integral o de Lagrange [15] Se omite el desarrollo matemático correspondiente dada su extensión. El autor, además, no desea apartarse del objetivo inicial trazado para este trabajo.
- 11°) En este trabajo se ha analizado el método del ángulo de protección aplicado a edificios. No se ha considerado el uso en líneas eléctricas de alta tensión. Sólo se presenta un esquema de protección en la figura 10, ideada por Schwaiger, quien fue uno de los precursores del método de la esfera rodante.
- 12°) La figura 11 muestra el efecto de la linealidad del criterio del ángulo de protección. Para todos los niveles de protección puede considerarse  $h_{int} (\%) = 100(h_{int}/h)$ , 25 %, aproximadamente y la penetración máxima  $p_{m\acute{a}x} (\%) = 100(p_{m\acute{a}x}/h)$ , es del orden del 7%.
- 13°) Resulta conveniente expresar que la efectividad de los sistemas convencionales de protección contra rayos se estableció a mediados del siglo XIX y los estudios estadísticos verificaron su efectividad en el siglo XX. Un referente muy importante de los sistemas de protección externa convencionales, según los profesores Uman y Rakov [6], es R. H. Golde.
- 14°) En [18] se resume la monumental labor del Dr Rudolph Heinrich Golde (1905 – 1979) en la protección contra las descargas atmosféricas en edificios, en líneas de transmisión y en sistemas de distribución eléctrica y se expresa que fue una autoridad mundial en la materia.

Se resalta, además, su contribución a los estudios estadísticos que realizó.

Su medular obra [17] - con más de 230 referencias bibliográficas - refleja el desarrollo técnico e histórico de los sistemas convencionales de protección.

15 °) A modo de información histórica, puede manifestarse que, con respecto al método de los ángulos de protección, se le atribuye a Franklin el concepto de cono de protección. En 1823, M. Gay Lussac realizó un informe sobre pararrayos y propuso un cono de protección con un radio de dos veces la altura del terminal captor. (concepto de zona de protección 2:1) Este informe fue adoptado por la Academia de Ciencias de Francia y fue aplicado en toda Francia y en casi toda Europa [19]. En 1840 Sir Williams Snow Harris realizó una importante contribución al analizar los daños ocasionados por los rayos en los barcos de la Real Armada británica. Además, propuso interesantes soluciones [19].

En 1879, R. Anderson publicó un interesante trabajo (*Lightning Conductor- Their History; Nature and Mode of the Application*). A este libro se lo ha considerado como una primera norma sobre protección contra rayos. Hace referencia a las instalaciones en Italia, Alemania y Francia, desde los años 1700 hasta la fecha de publicación de la obra.[19].

En 1880, W.H. Peerce condujo los experimentos para medir el campo eléctrico de un captor vertical. Sus conclusiones establecieron que “una varilla captora vertical” protege un espacio cónico, cuya altura es la longitud de la varilla, cuya base es un círculo teniendo un radio igual a la altura de la varilla y cuyo lateral es el cuadrante de un círculo, cuyo radio es igual a la altura de la varilla (Concepto de zona de protección 1:1). [19] y [11],

En 1882, en Londres, se celebra la Conferencia sobre Puntas Captadoras de Rayos (“*Lightning Rod Conference*”).

En 1892, Sir Oliver Lodge realizó un resumen de las zonas de protección. Véase al respecto de éste y otros aspectos relativos tratados en este trabajo, la excelente obra [11].

En 1904, se realizó en la ciudad de St. Louis, EE.UU., el Primer Congreso Internacional Electrotécnico.

”Argentina [13] envió como representantes a Luis A. Huergo, primer ingeniero recibido en el país y a Jorge Newbery, primer ingeniero electricista argentino.. En ese entonces, se decidió la creación de una Comisión Electrotécnica Internacional

En 1906, Jorge Newbery fue invitado a participar nuevamente del Congreso, realizado en Londres, donde se constituyó la *International Electrotechnical Commission* (IEC), dentro de cuyos objetivos estaban la unificación de símbolos eléctricos, las tensiones de uso y las instalaciones eléctricas.

En 1913, Jorge Newbery concurre como representante de la Argentina a la Reunión Plenaria de la IEC, realizada en Berlín, y gracias a sus esfuerzos por aprobar un Decreto del Poder Ejecutivo Nacional, se creó una Comisión Honoraria Electrotécnica Argentina, bajo dependencia del entonces Ministerio de Agricultura, estableciéndose que se hiciera cargo de la cuota societaria de la IEC.”

En 1904, la NFPA pone en vigencia Las Especificaciones para la Protección de Edificios contra Rayos.

En 1920, Lee R. H presenta su trabajo *Protecction Zone for Building Against Lightning Strokes Using Line Practice*, en un documento de la IEEE y Viemeister P.E. publica The Lightning Book Continuando con [19] se menciona Larmor & Larmor aplicando la teoría de Maxwell. En este trabajo se determinan los valores de los ángulos de protección.

En 1938, A. Schwaiger llega a las mismas conclusiones que Peerce.

Para tener un panorama técnico e histórico completo, véanse [16] [17] y [19].

En 1990, aparece la norma IEC 61 024-1. En la tabla 1 de esta norma se establecen los límites de uso de los métodos de protección. Figuran los valores de los ángulos de protección solamente para determinadas alturas. En [2] aparecen las curvas continuas de ángulos en función de la altura.

En 1996, el Instituto Argentino de Normalización (IRAM) publica la norma IRAM 2 184-1 [3], sobre la base de la norma IEC 61024-1.

En la actualidad, el Comité TC 81 de la IEC está elaborando un formidable cuerpo normativo para la Protección contra Descargas Atmosféricas, sobre la base de las normas existentes y de nuevos conceptos y procedimientos. Constituye el mayor esfuerzo internacional de todos los tiempos en un intento por normalizar sistemáticamente sobre el variado temario de la protección contra las

descargas atmosféricas [14].

La lista de esquemas (drafts) de las normas en estudio es:

- IEC 62 305-1 Ed. 1.0 Protection against lightning - Part 1: General principles
- IEC 62 305-2 Ed. 1.0 Protection against lightning - Part 2: Risk management
- IEC 62 305-3 Ed. 1.0 Part 3: Physical damage to structures and life hazard
- IEC 62 305-4 Ed. 1.0 Protection against lightning - Part 4: Electrical and electronic systems within structures
- IEC 62 305-5 Ed. 1.0 Protection against lightning - Part 5: Services

El conjunto de normas actualmente en vigencia en la IEC y las correspondientes del IRAM son:

<u>IEC 61 024-1 (1 990-04) (IRAM 2 184-1)</u> Protection of structures against lightning – Part 1: General principles	Inglés y francés
<u>IEC 61 024-1-1 (1 993-09) (IRAM 2184-1-1)</u> Protection of structures against lightning - Part 1: General principles - Section 1: Guide A: Selection of protection levels for lightning protection systems	Inglés y francés
<u>IEC 61 024-1-2 (1 998-05) (Reglamentación AEA, en estudio)</u> Protection of structures against lightning - Part 1-2: General principles - Guide B - Design, installation, maintenance and inspection of lightning protection systems	Inglés y francés
<u>IEC 61 312-1 (1 995-03) (Norma IRAM 2 427-1)</u> Protection against lightning electromagnetic impulse - Part 1: General principles	Inglés y francés
<u>IEC/TS 61 312-2 (1 999-08)</u> Protection against lightning electromagnetic impulse (LEMP) - Part 2: Shielding of structures, bonding inside structures and earthing	Inglés y francés
<u>IEC/TS 61 312-3 (2 000-07)</u> Protection against lightning electromagnetic impulse - Part 3: Requirements of surge protective devices (SPDs)	Inglés y francés
<u>IEC/TS 61 312-4 (1 998-09)</u> Protection against lightning electromagnetic impulse - Part 4: Protection of equipment in existing structures	Inglés y francés
<u>IEC/TR2 61 662 (1 995-04) (Norma IRAM 2 425)</u> Assessment of the risk of damage due to lightning	Inglés y francés
<u>IEC/TR2 61 662-am1 (1 996-05) (Norma IRAM 2 425)</u> Amendment No. 1 to IEC 1 662 (Norma IRAM 2 425)	Inglés y francés
<u>IEC 61 663-1 (1 999-07)</u> Lightning protection - Telecommunication lines - Part 1: Fibre optic installations	Inglés y francés
<u>IEC 6 1663-1 Corr.1 (1 999-10)</u> Corrigendum 1	Inglés y francés
<u>IEC 61 663-1 (1 999-07)</u> Versión Oficial En español (Incluye corrigendum de octubre 1999) Protección contra el rayo. Líneas de telecomunicaciones. Parte 1: Instalaciones de fibra óptica.	Inglés y francés.español
<u>IEC 61 663-2 (2 001-03)</u> Lightning protection - Telecommunication lines - Part 2: Lines using metallic conductors	Inglés y francés
<u>IEC 61 663-2 (2 001-03)</u> Versión Oficial en Español - Protección contra el rayo. Líneas de telecomunicación. Parte 2: Líneas utilizando conductores metálicos.	Español

## **VI- AGRADECIMIENTO**

El autor agradece la colaboración especial del Prof. Ing. Juan C. Arcioni; quien con dedicación sumada a su vasta experiencia como autor de innumerables artículos técnicos y como “implacable normalizador”, revisó todo el texto del trabajo y realizó correcciones muy valiosas para una mejor comprensión del lector.

También agradece el autor al Dr. Ing. Peter Hasse la mención que realizó en la conferencia que dictó el 26 de noviembre de 2003 en el Edificio Siemens en Buenos Aires sobre la nueva normativa del Comité 81, en la cual expresó que el resultado que se logró en el presente trabajo para el cálculo del ángulo de protección de una punta Franklin es una mejor aproximación que el método establecido por la IEC y que las fórmulas desarrolladas constituyen una herramienta útil para aplicar en el cálculo automático; en computadoras.

## **VII – REFERENCIAS**

- [1] Peter Hasse: Overvoltage protection of low voltage systems; 2<sup>nd</sup> 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: 2003 - 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 1996 - 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 (spcr)”.
- [4] A. Di Napoli, M. Di Stefano, C. Mazzetti, U. Ratti: Criterio di esposizione per la protezione delle fulminazioni di origine atmosferica. Istituto di Elettrotecnica dell’ Università di Roma. “L’Elettrotecnica” Vol. LXV n.1 Gennaio 1978.
- [5] Celina Haydeé Repetto: Manual de Análisis Matemático. Segunda Parte. Ediciones Macchi. Primera Reimpresión 1989, de la primera Edición de 1981. (Página 165).
- [6] M. A. Uman and V.A. Rakov: A Critical Review of no Conventional Aproaches 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] Installation instructions – Air termination Rod .DEHN + SÖHNE Druckschrift Nr. 1436/Stand 06.02 N°043248. Table 2. Calculation of the air termination rod; 2002.- **[11]**Duilio Moreira Leite e Carlos Moreira Leite: Proteção Contra Descargas Atmosféricas. Oficina de Mydia.1997.
- [ 8] Committee E1 - 024 DR 2359 (Project ID 2 280) Draft for Public Comment Australian/ New Zealand Standard ( 26/06/2002 - 12/09/2002). Lightning Protection.
- [ 9] C.B. Moore. Background for the AMS Statement on Lightning Protection Systems. New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, NM. Yahoo Groups: Lightning Protection; 2003.
- [10] NFPA 780: Standard for the installation of Lightning Protection System. Ed. 2000.
- [11]Duilio Moreira Leite e Carlos Moreira Leite: Proteção Contra Descargas Atmosféricas. Oficina de Mydia.1997
- [12] T. Horváth. Rolling Sphere - Theory and Applications; 25<sup>th</sup> ICLP. Rhodes. Greece. September 18- 22, 2 000.Conference Proceedings: 4.8 (pages. 301 - 305).
- [13] Julio di Salvo. Revista Electrotécnica .Edición N° 3. Octubre 2003. Editorial ([www.aearevista.org.ar](http://www.aearevista.org.ar) )
- [14] Angel Reyna. Conferencia: "La participación argentina en la elaboración de normas de la IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) sobre la protección contra las descargas atmosféricas" 5-11-03. BIEL
- [15] Celina Haydeé Repetto: Manual de Análisis Matemático. Primera Parte. Ediciones Macchi. Primera Reimpresión 1 989, de la primera Edición de 1981. (Páginas 420 – 422)).
- [16] Charles B. Moore, Emeritus Professor of Physics, Emeritus Chairman, Langmuir Laboratory for Atmospheric Research. New Mexico. Institute of Mining and Technology. Socorro; Martin Uman, Professor and Chair Department of Electrical and Computer Engineering. University of Florida. Gainesville. Vladimir A. Rakov, Professor and Chair Department of Electrical and Computer Engineering. University of Florida. Gainesville and other 14 scientists: The Scientific Basis for traditional Lightning Protection Systems. Report of the Committe on Atmospheric and Space Electricity of The American Geophysical Union. June 2001.
- [17] R. H. Golde Lightning Protection. Edward Arnold Ltd.London. 1973.
- [18] CIGRÉ “ELECTRA “ N° 68: pp 65-66. Obituary of R. H. Golde. (Contribución del Prof. Arcioni al autor).
- [19] John M. Tobías P.E., Charles L. Wakefield, Larry W. Strother, Vladislav Mazur, Ph.D, Josephine Covino, Ph.D, John R. Fredlund, Hugh J. Christian, Jr, Ph.D, Monte Bateman, Ph.D: Report of the Federal Interagency Lightning Protection User Group The Basis of Conventional Lightning Protection Technology. A review of the scientific development of conventional lightning protection technologies and standards. USA, June 2001.
- [20] Hasse / Wiesinger: EMV - Blitz - Schutzzonen-Konzept Pflaum Verlag München- VDE -Verlag Berlin - Offenbach, 1993 (Seite 108-115).

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

**Empresa: Angel Reyna y Asociados S.R.L (“DEHN en la Argentina”)**

**[angelreyna@uolsinectis.com.ar](mailto:angelreyna@uolsinectis.com.ar)**

(\* \*) A modo de modesto y anticipado homenaje, al Dr. Benjamin Franklin (1706 – 1790), a los 300 años de su nacimiento, que se cumplirán el 17/01/06.

El autor vería con mucho agrado que el término “punta Franklin” (“Franklin rod”) fuera adoptado como vocablo en la normativa nacional e internacional, atítulo de recuerdo permanente al inventor de los sistemas de protección contra descargas atmosféricas. Se podría usar con aditamentos cuando corresponda tales como “mejorada” por tal procedimiento.

(\* \* \*) Michel Rolle (1 652 –1 719), miembro de la Academia Real de Ciencias de París y Joseph Louis Lagrange (1 736 –1 813), vivieron como Franklin, en mayor parte Lagrange, en el siglo XVIII, de las “Luces” francesas. De Lagrange - también miembro de la Real Academia de Ciencias de París – según comentarios de la Profesora Celina Repetto en la obra [15]: “El emperador Federico el Grande lo llama a Berlín en estos términos. “Donde estoy yo, el más importante rey de Europa, debe estar Ud. que es el más importante matemático”. “Después de la muerte de Federico el Grande lo manda a llamar desde París el rey de Francia, Luis XVI”. Llega a esta ciudad en 1787, casi

coincidiendo con la publicación de su obra Mécanique Analytique. Franklin había visitado Francia en 1767 y 1769. En 1772 fue elegido Miembro de la Academia de Ciencias de Francia. En 1776, Franklin llega nuevamente a Francia como Embajador de las Colonias que habían declarado su independencia de Inglaterra. Juega un rol decisivo en la Alianza con Francia y desde allí, en 1782, participa activamente en las negociaciones de paz con Inglaterra. En 1784, escribe en Passy, lugar de su residencia cercano a París, la segunda parte de su Autobiografía. Permanece en Francia hasta 1785. Fue distinguido, también en 1781, como miembro de la Academia de Ciencias, Letras y Artes de Padua (Italia). En este país, el filósofo Giambatista Beccaria – con quien mantenía una relación epistolar - promulgó en Italia los conocimientos científicos de Franklin. Se entrevistó con Volta en Francia. En 1778, el Senado de Venecia dispone, por un decreto, el uso de puntas Franklin en toda la República. Franklin había visitado a Alemania en 1766 durante 2 meses. En todos los lugares que visitaba era respetado y admirado. Desde Francia, concretó un tratado de colaboración con Alemania. El célebre filósofo alemán, autor de la “Crítica de la Razón Pura”, Immanuel Kant (1724 –1804), lo designó “Prometheus der neueren Zeiten” (Prometeo de los nuevos tiempos).

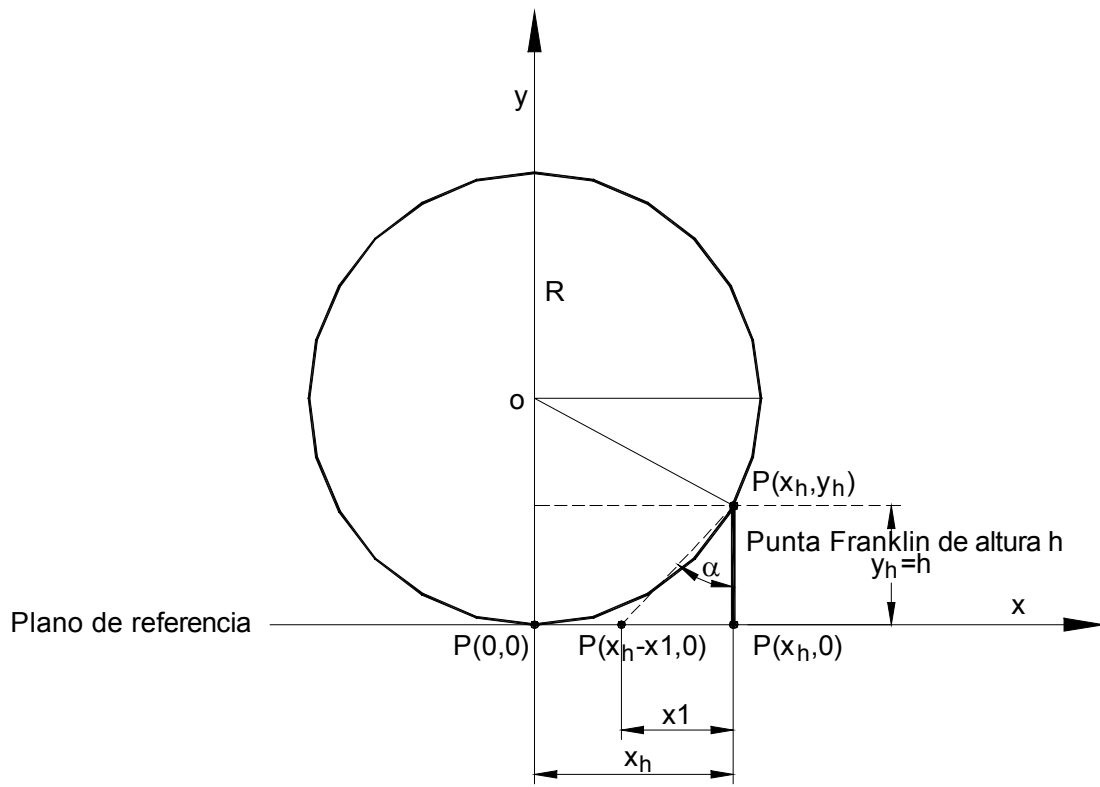


Fig.1

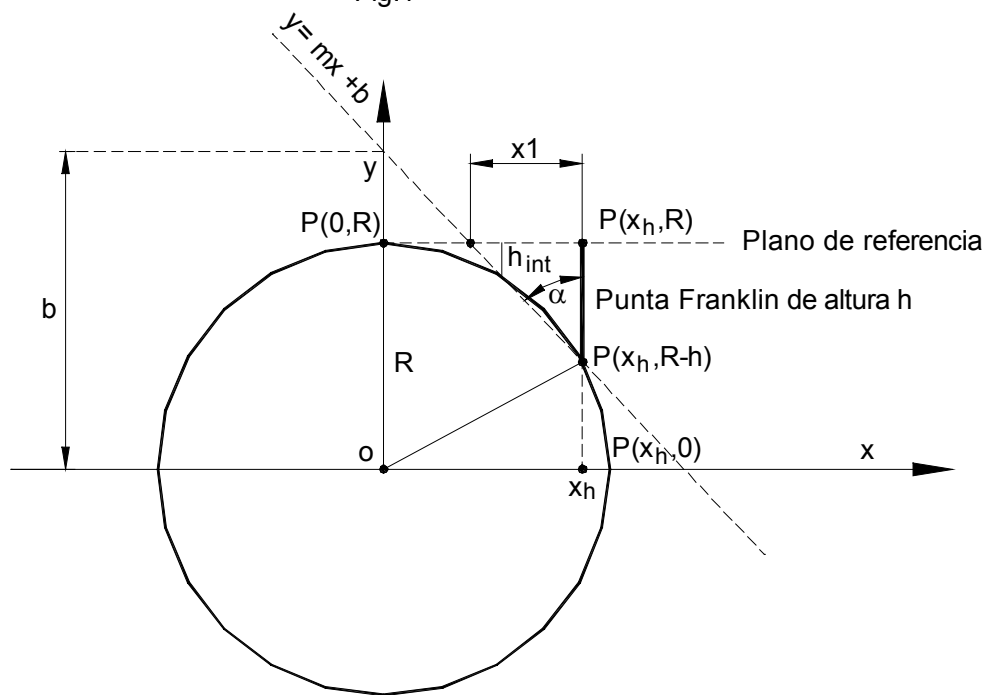


Fig.2

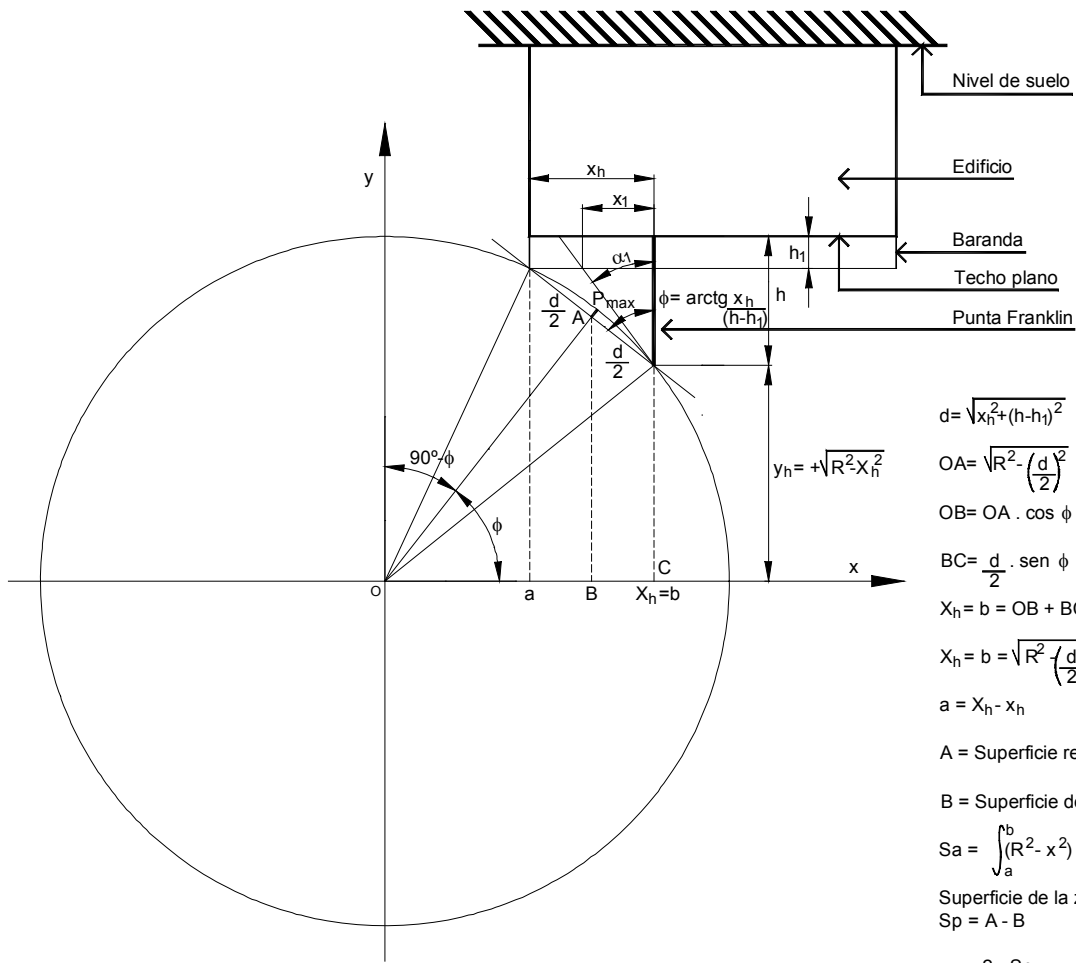


Fig.3.a - Bases para la determinación de  $\alpha_1$

$$d = \sqrt{x_h^2 + (h-h_1)^2}$$

$$OA = \sqrt{R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

$$OB = OA \cdot \cos \phi$$

$$BC = \frac{d}{2} \cdot \sin \phi$$

$$X_h = b = OB + BC = OA \cdot \cos \phi + \frac{d}{2} \cdot \sin \phi$$

$$X_h = b = \sqrt{R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \cdot \cos \phi + 0,5 \cdot \sqrt{x_h^2 + (h-h_1)^2} \cdot \sin \phi$$

$$a = X_h - x_h$$

A = Superficie rectángulo de ancho  $x_h$  y largo  $h + y_h$

B = Superficie debajo del arco de circunferencia entre "a" y "b"

$$S_a = \int_a^b (R^2 - x^2) \cdot dx$$

Superficie de la zona de protección sobre el techo del edificio  
 $S_p = A - B$

$$x_1 = \frac{2 \cdot S_p}{(h-h_1)} \quad ; \quad \alpha_1 = \arctg \frac{x_1}{(h-h_1)}$$

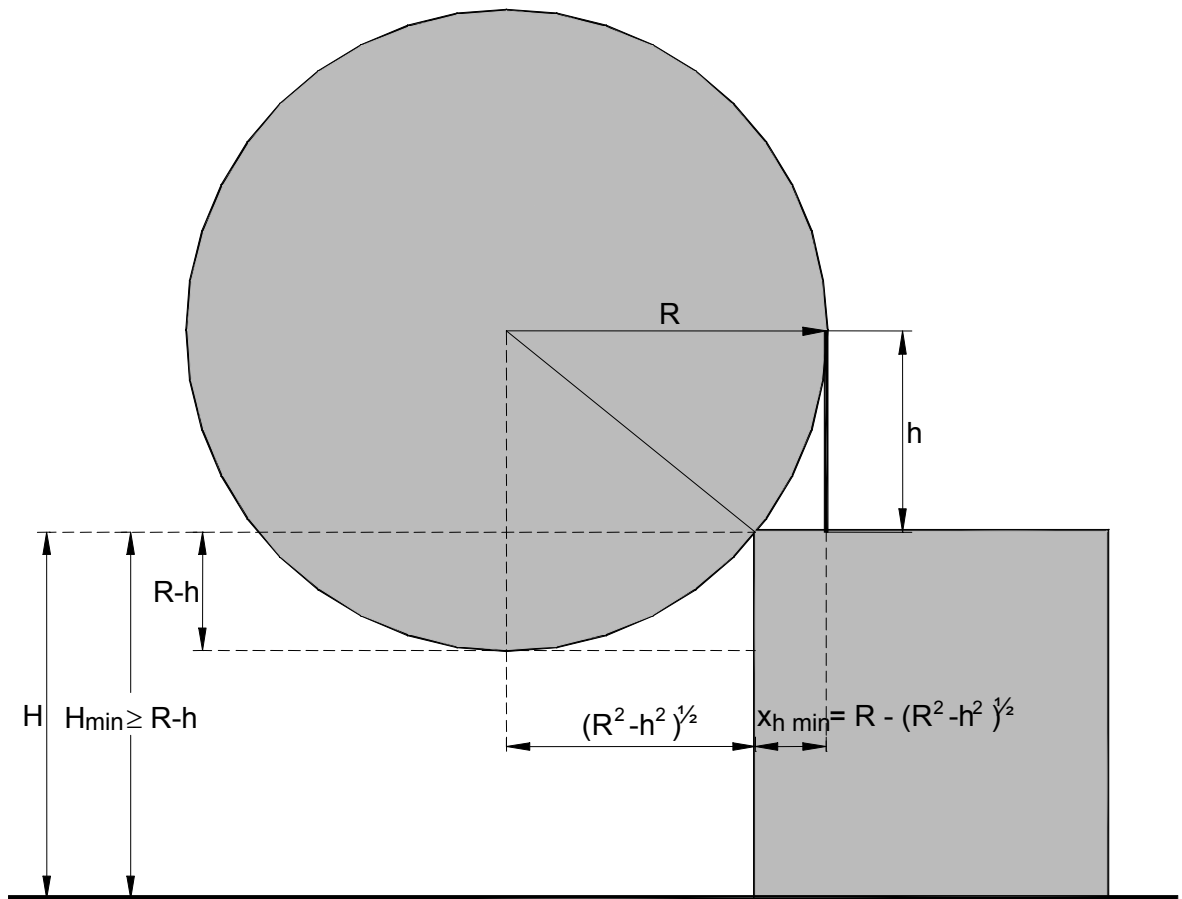
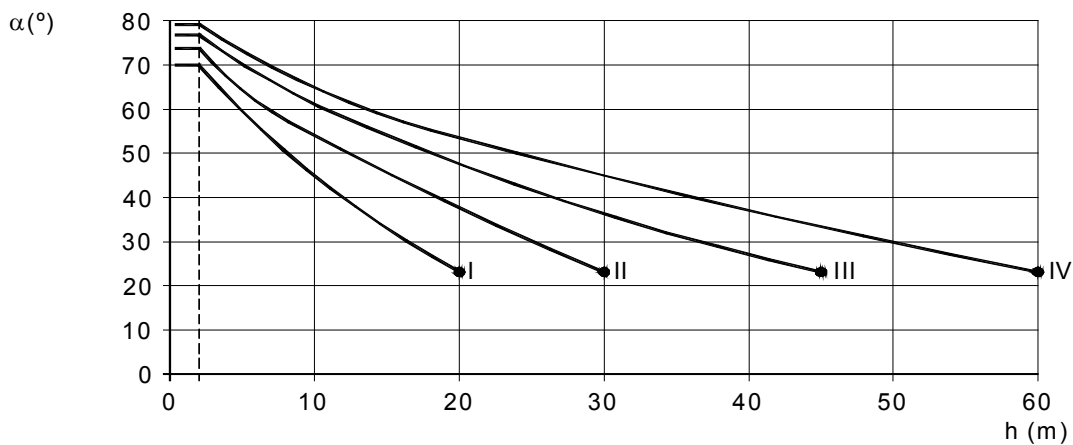
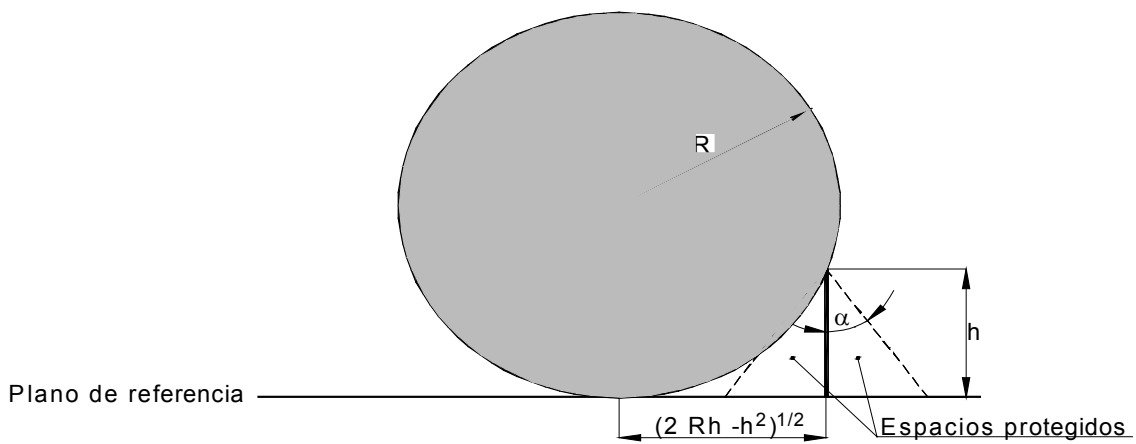


Fig. 3.b- Bases para la determinación de  $x_{h \min}$

Tabla 1 Colocación del dispositivo captor en función del nivel de protección.

Nivel de Protección	Métodos de protección		
	De la Esfera "Rodante" Radio R m.	De las Mallas Máximas dimensiones m.	Del Ángulo de protección Valores de $\alpha$ ( $^{\circ}$ )
I	20	5 x 5	Véanse figura y gráfico debajo de esta tabla
II	30	10 x 10	
III	45	15 x 15	
IV	60	20 x 20	



Se puede seleccionar el ángulo de protección  $\alpha$  ( $^{\circ}$ ) del gráfico superior o se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha \text{ (}^{\circ}\text{)} = 180 / \pi \text{ ) arctg } \left[ \frac{(R + h) (\sqrt{2Rh - h^2}) - R^2 \arcsen\left(\frac{\sqrt{2Rh - h^2}}{R}\right)}{h^2} \right]$$

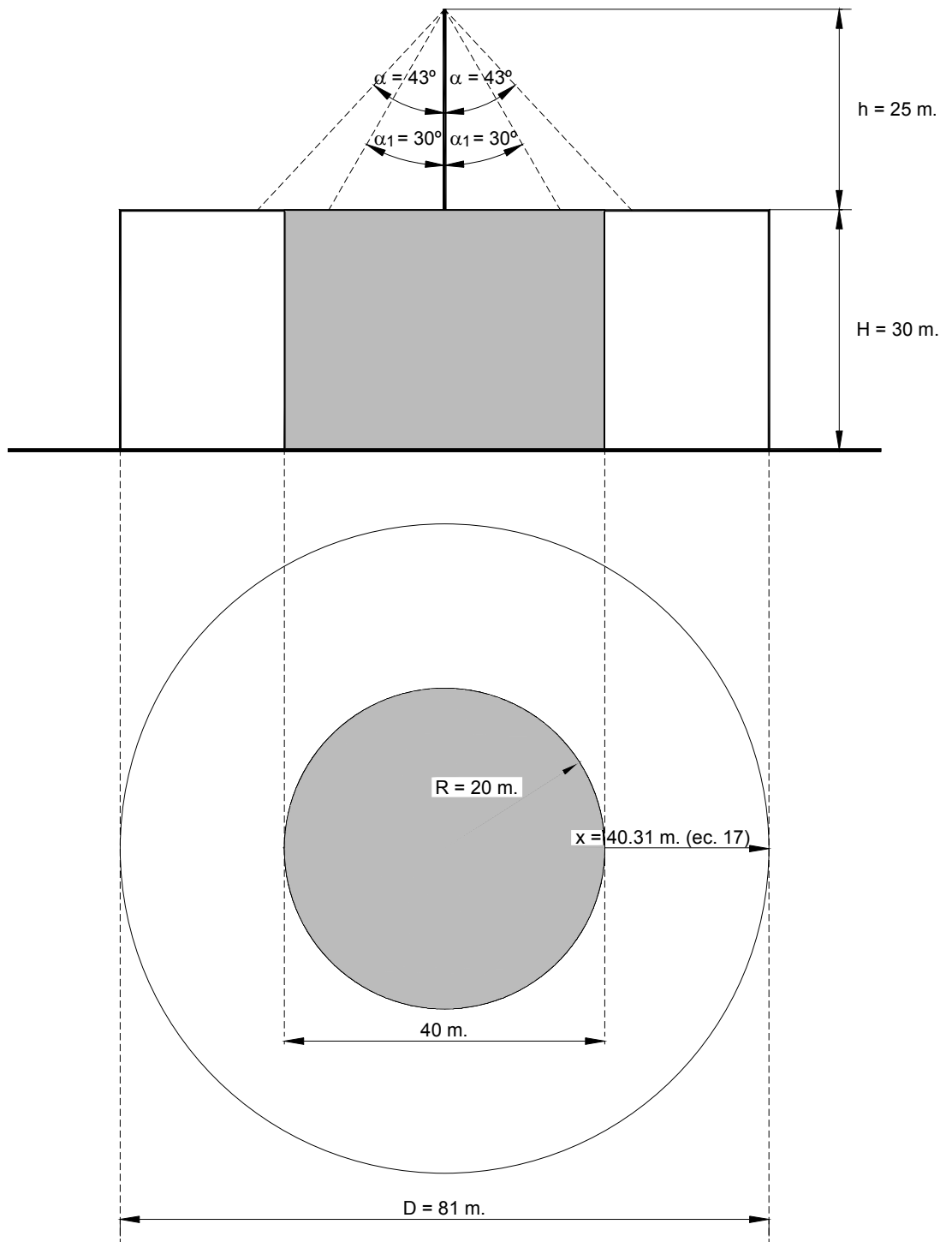


Fig.5 - El ángulo de  $43^\circ$  se podría aceptar si el edificio tuviera  $D = 81 \text{ m}$  aproximadamente.

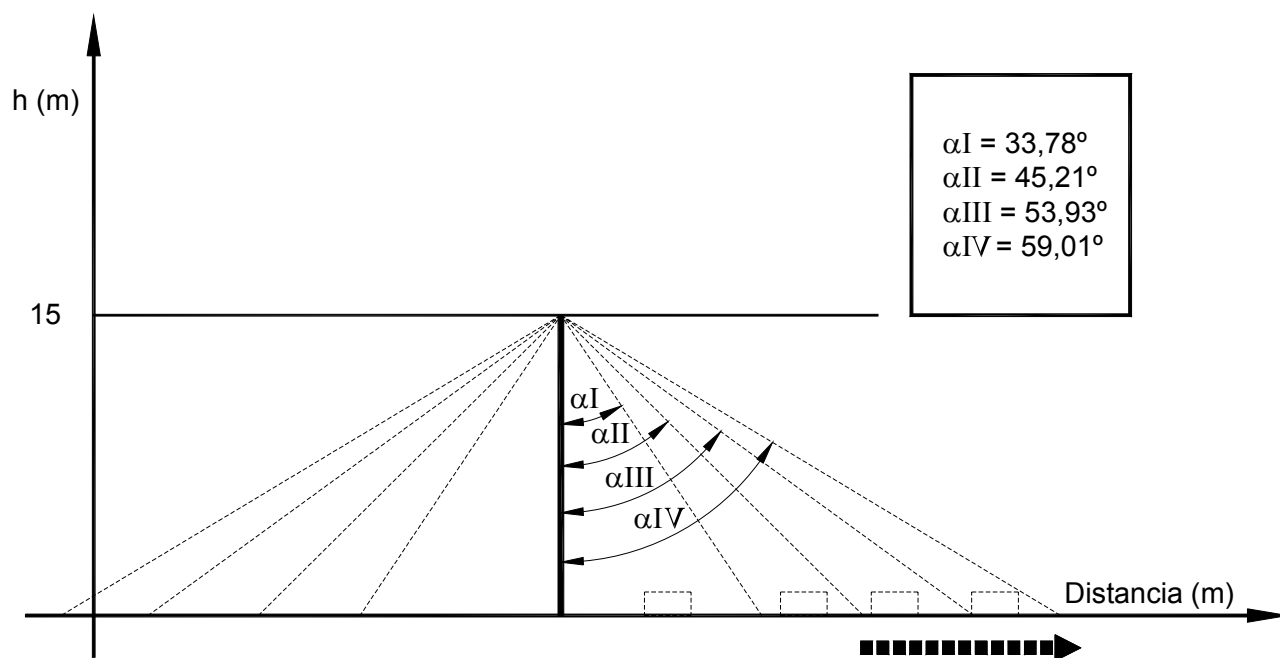
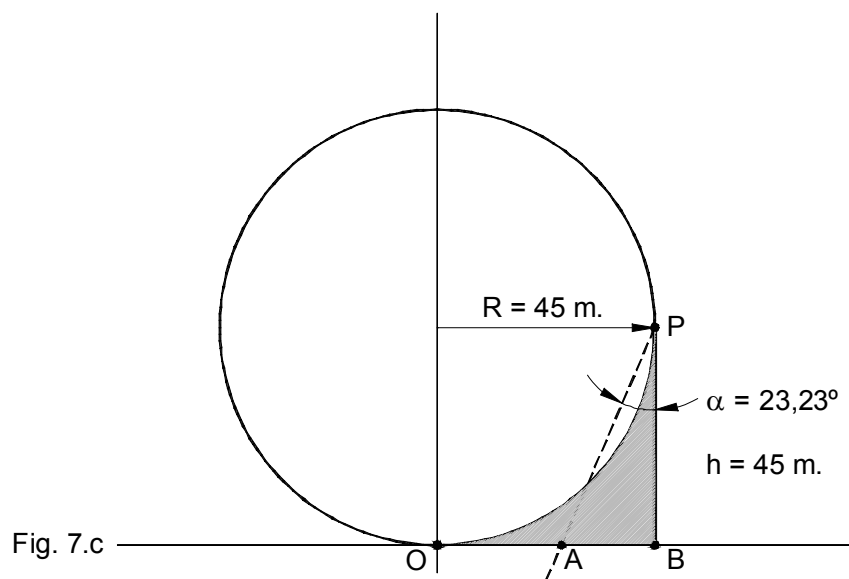
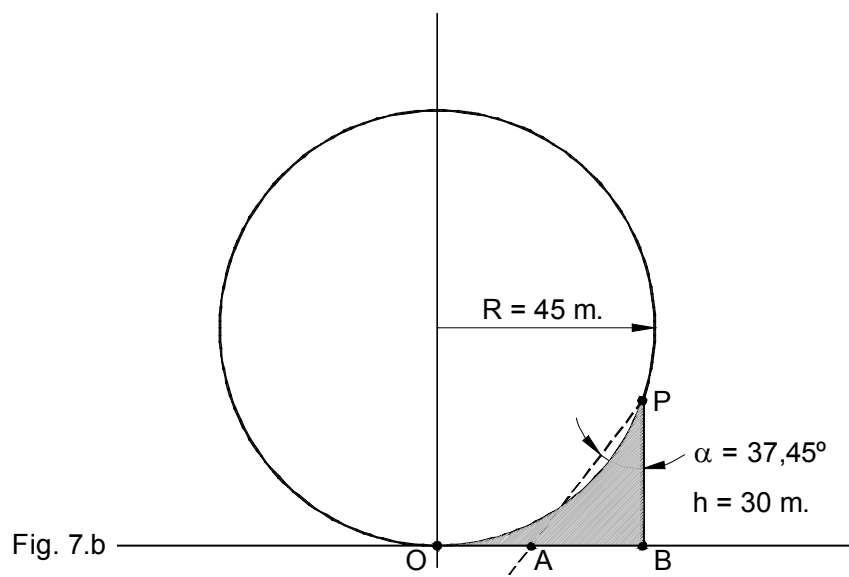
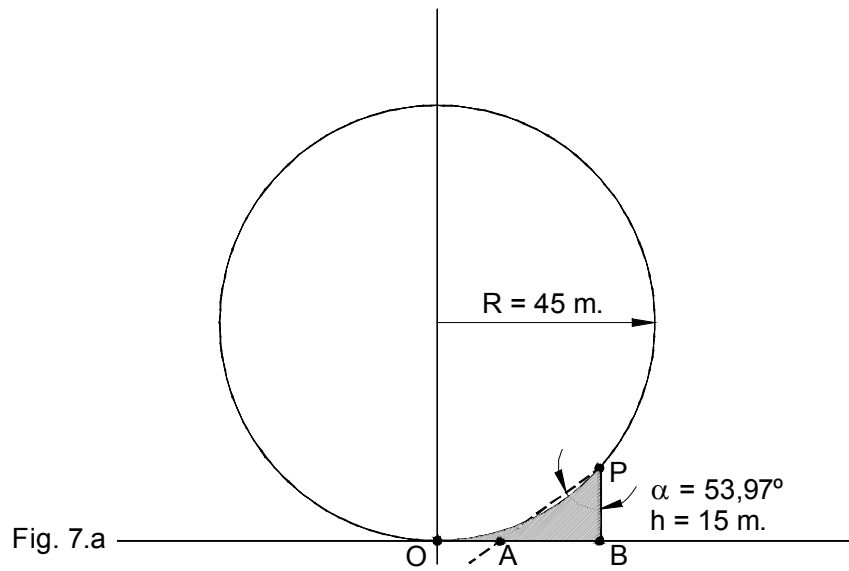


Fig.6- Componentes de las zonas de protección.





Área OPBO = Área APBA

Fig. 7- Zonas de protección equivalentes ( tercer nivel de protección)

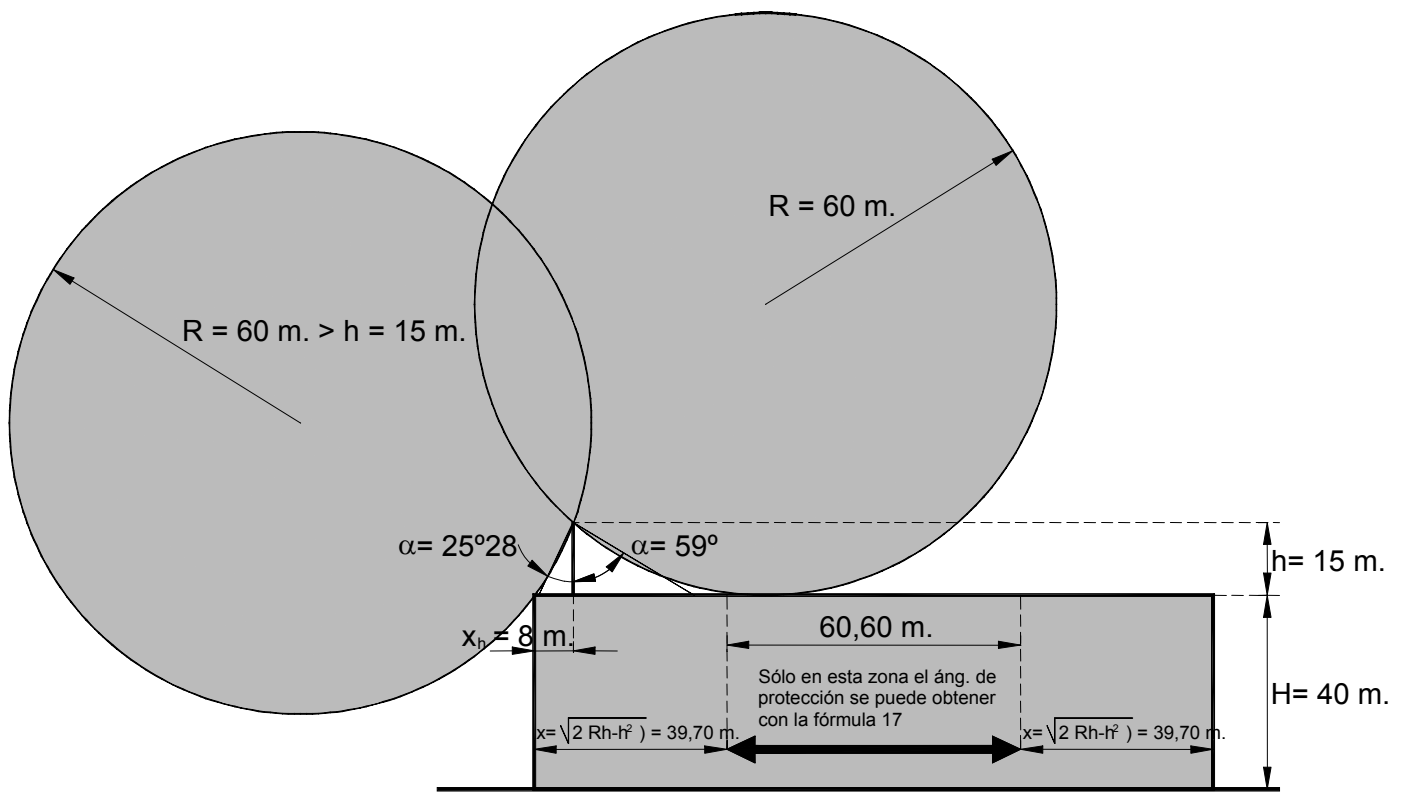


Fig. 8- Diferentes ángulos de protección según corresponda aplicar las ecuaciones (17) ó (27)

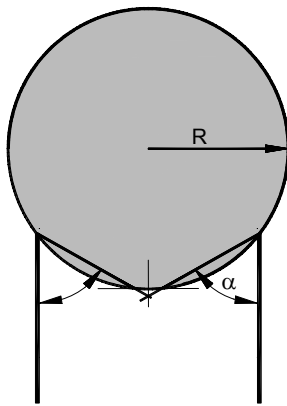
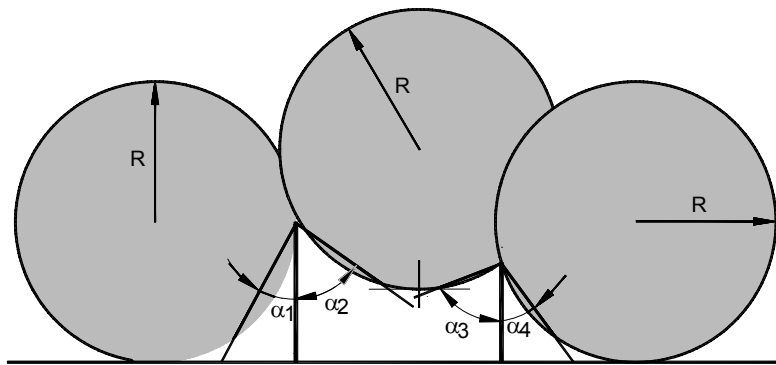


Fig. 9.a - Puntas de igual altura.



2 3

Fig. 9 - Angulos de proteccion entre dos puntas Franklin.

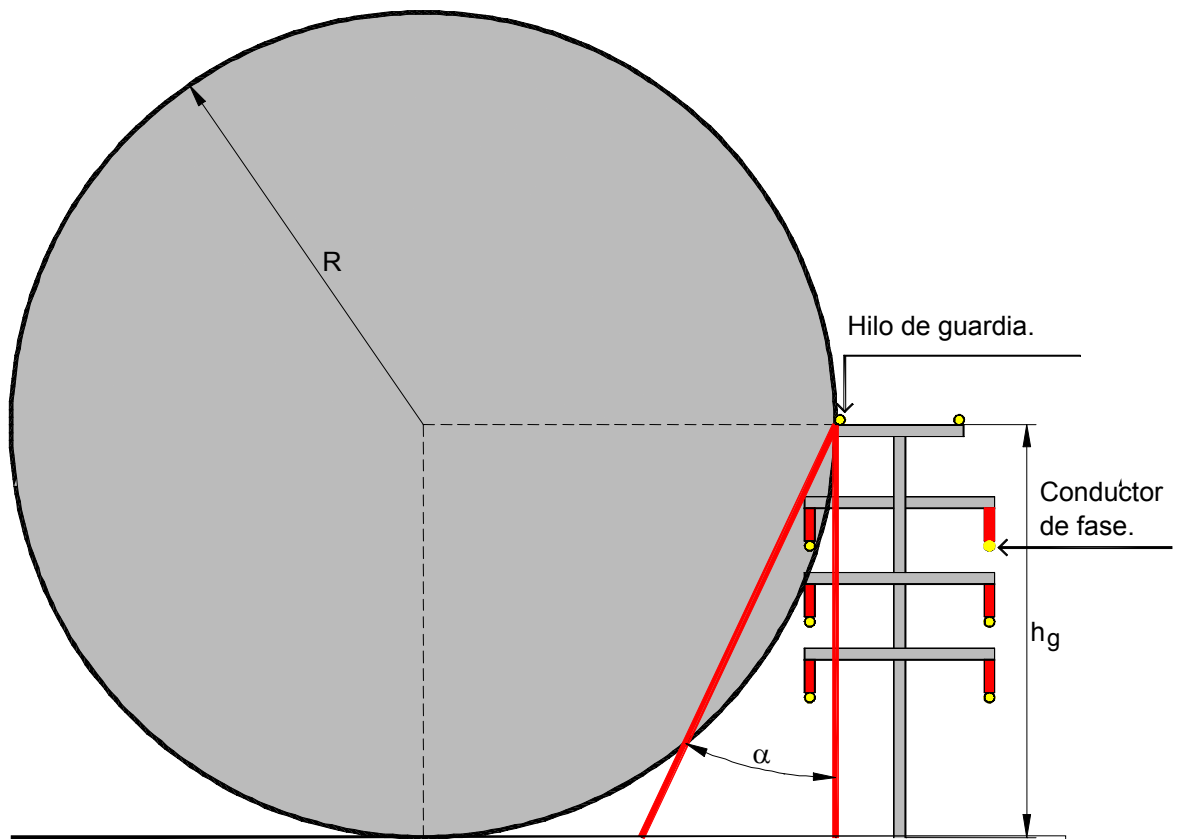


Fig. 10 - Los elementos captadores, en este caso hilos de guardia de una línea de alta tensión, con  $R = \text{altura del hilo de guardia}$  ( método de Schwaiger), presentan un ángulo muy pequeño de protección. El criterio del ángulo de protección - que da el método de la igualdad de áreas - es mucho menos exacto - en la parte alta - que el método de la zona de protección que da la esfera rodante.

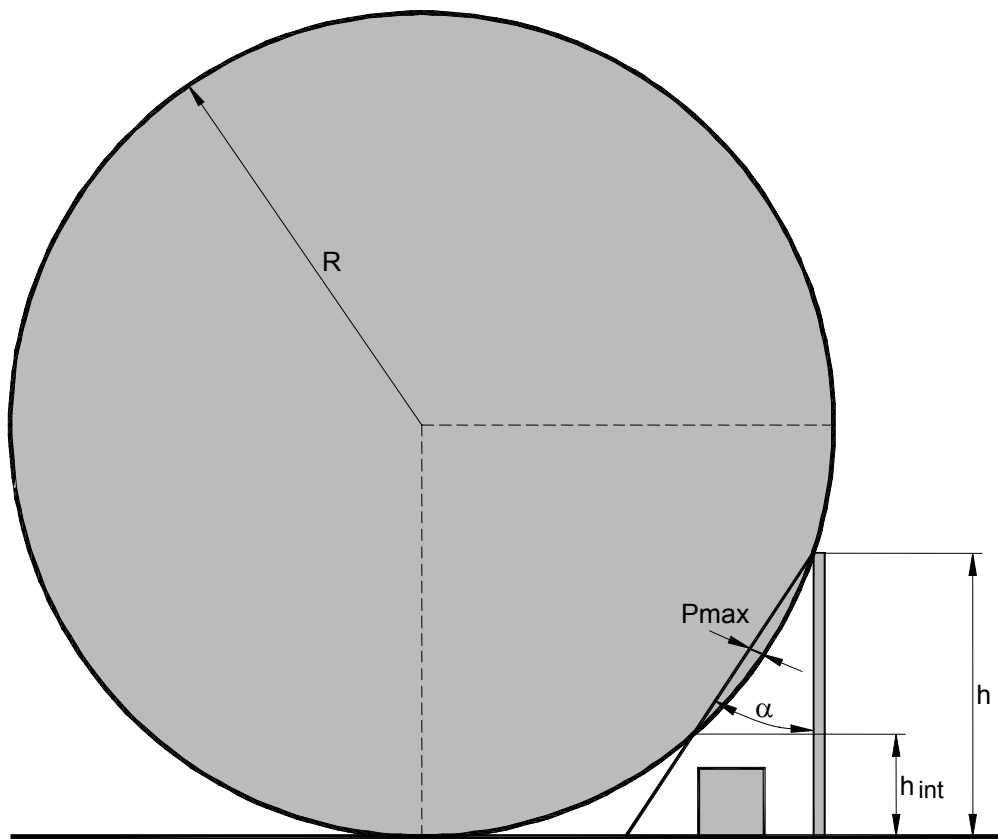


Fig. 11 - En la parte baja desde el nivel del suelo hasta  $h$  los objetos quedan igualmente protegidos por ambos métodos.