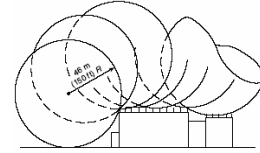


“MÉTODOS DE UBICACIÓN DE LOS CAPTADORES”

*Elaborado por: Ing. Frank Amores Sánchez,
Especialista PCI, APCI.*



La ubicación de los captadores depende del modelo físico usado para describir el comportamiento del rayo. El desarrollo de estos modelos no se detenido en los últimos 250 años y tienen su base en las observaciones físicas del rayo. Aunque los modelos tienden a ser simplificados si se comparan con las características reales del desarrollo y propagación del rayo, sus efectividades han sido probadas mediante observaciones empíricas hechas durante largos períodos de tiempo.

Los captadores están diseñados para interceptar el rayo ofreciendo un punto de impacto preferido para su descarga eléctrica. Estos realmente operan emitiendo un líder de propagación ascendente para interceptar el líder descendente del rayo. Como estos líderes son aire ionizado de cargas opuestas, se atraen y, una vez que estos se conectan, aportan al rayo el canal eléctrico para su conducción a la tierra. Los captadores emplazados sobre una estructura no aumentan sustancialmente la probabilidad de impacto sobre esta, sino que brindan un punto preferido de impacto al convertirse en un punto con mayor probabilidad de impacto de rayo. Una vez que el rayo se conecta con el captador, es más fácil controlar su corriente y dirigirla a la tierra; de lo contrario, tomaría una trayectoria aleatoria, no controlada y normalmente dañina a través de otras partes de la estructura.

MÉTODOS:

Los métodos se utilizan para identificar la ubicación más adecuada de los captadores, basada en el área de protección brindada por cada uno de estos.

La norma NFPA 780 utiliza dos métodos de ubicación:

1. “Ángulo de protección”, que es una construcción puramente geométrica.
2. “Esfera rodante”, que involucra relaciones empíricas de la distancia de impacto y la corriente pico del rayo y es parcialmente una construcción geométrica.

La norma IEC 62305 además de los métodos anteriormente citados, propone el uso del:

3. “Método de la malla”

Método del Ángulo de Protección.

Este método se basa en la asunción de que un captador u objeto elevado conectado a tierra crea un espacio cónico adyacente que es inmune al rayo. El concepto del “Cono de Protección” para definir una zona de protección tiene sus raíces en los inicios mismos de los estudios de protección contra rayo. Aunque a finales de los



1700 Franklin reconoció su limitación en el intervalo de captura, este concepto fue formalmente propuesto por la Academia Francesa de Ciencias en 1823 e inicialmente usado con una relación de la base igual a dos veces la altura (o sea, un ángulo de 63°). En 1855, este ángulo se cambió a 45° debido a los fallos reportados con este método. A través del tiempo han sido usados otros ángulos con un nivel de éxito variable. Es evidente que mientras más pequeño se asuma el volumen del cono de protección, más efectivo será el captador en la intercepción del líder de rayo. En algunas normas actuales, se usa un ángulo variable con la altura de la estructura. Además, este ángulo de protección puede aumentarse cuando se considera la ubicación de un captador en el interior de grandes superficies planas, debido a la reducida intensidad campo eléctrico.

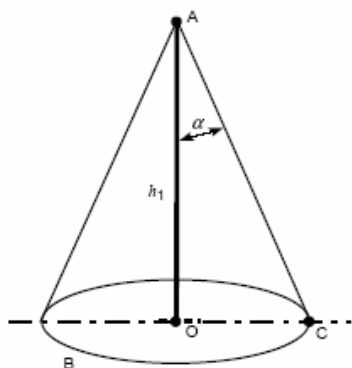
Posicionamiento del sistema de captura

La ubicación del sistema de captura se considera adecuada si la estructura a proteger está situada completamente dentro del volumen de protección dado por dicho sistema.

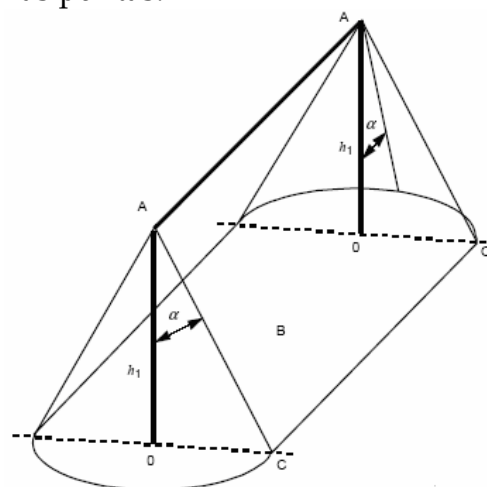
Para la determinación del volumen de protección sólo se considerarán las dimensiones físicas reales de los captadores.

El volumen de protección mediante una punta Franklin se asume que tiene la forma de un cono recto de base circular con vértice localizado en el extremo de la punta y semiángulo α que depende del nivel de protección y altura de la punta.

El volumen de protección mediante un conductor tendido se define por la composición de los volúmenes protegidos por las puntas verticales virtuales y los conductores que viajan entre los extremos de las puntas.



Volumen de protección de la punta Franklin



Volumen de protección del hilo tendido

Fig. 1 Volúmenes de protección por el método del ángulo.

El radio de protección es:

$$r = \tan \alpha \cdot h$$

donde:

α semiángulo de cono de protección

h altura relativa del captador

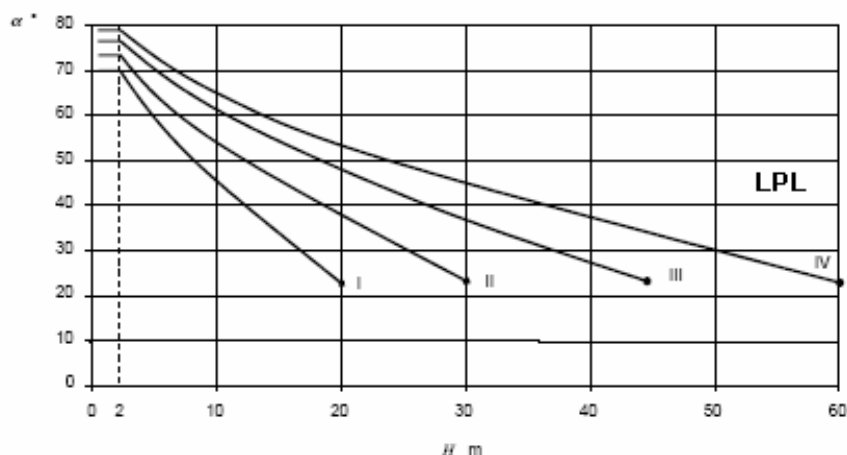


Fig. 2 Gráfica para la determinación del ángulo de protección

Este método no es aplicable para alturas relativas del captador por encima de los valores marcados (■). El ángulo no varía para H inferiores a 2 m.

Se ha demostrado que la teoría en que se fundamenta este método no es plenamente efectiva, por ello en las últimas décadas se utiliza preferentemente el concepto de la "esfera rodante". Este reduce significativamente el "volumen protegido" y parecer ser que lo describe con mayor exactitud, aunque tampoco es 100% efectivo.

Método de la Esfera Rodante.

Este método fue introducido por primera vez en la norma húngara de protección contra rayo de 1962. Los primeros estudios hechos con este método fueron aproximadamente en 1970 en los Estados Unidos. Fue en 1978, para la protección contra el impacto del rayo de los conductores de las líneas de transmisión de energía eléctrica, cuando primero se aplicó. Se introdujo en la NFPA 780 en la edición de 1980. Actualmente, es el método que más frecuentemente aparece en los documentos normativos de todo el mundo.

La base física de este método es el Modelo Electrogeométrico (EGM). Para aplicarlo se hace rodar una esfera imaginaria sobre la estructura en todas las direcciones. Se

considera que todos los puntos de contacto requieren protección y que no es necesaria en las superficies y volúmenes no afectados.

Este método parte de las siguientes suposiciones fundamentales:

- el punto de impacto del rayo se determina cuando el líder descendente se aproxima a la tierra o a una estructura a la distancia de impacto.
- el rayo impacta al objeto en la tierra que se encuentre más cerca de su punto de discriminación y, por tanto, la peor posición es cuando el centro de una esfera es común a varios objetos en la tierra.

Como el radio de la esfera y la distancia de impacto están relacionados con la corriente del rayo, estas suposiciones permiten concluir que el rayo no impactará una estructura protegida si su distancia de impacto es mayor que el radio de la esfera.

Para un valor típico de corriente pico de 10 kA, la distancia de impacto es aproximadamente 45 m. Esta es la distancia a la cual un líder descendente produce la iniciación de un líder ascendente desde la estructura.

Nótese que mientras menor es la distancia de impacto (que implica una corriente pico de rayo más baja) la esfera que puede penetrar en la zona de protección es más pequeña. Cuando se requiere hacer un diseño más conservador se selecciona el radio de la esfera usando una corriente pico menor. Como no son muy probables valores de corriente entre 5 kA y 7 kA, generalmente se asume una corriente de 10 kA que representa 91 % de todos los eventos de rayo.

Además, puede verse que la esfera rodante estándar de 45 m de radio, no es apropiada para superficies planas. Usando el valor de tensión nominal de ruptura del aire de 3 MV/m para las geometrías planas, la ruptura será iniciada por un líder descendente de 3000 m de longitud cuando éste lleve una carga de aproximadamente 12 C. Esta carga corresponde a una corriente pico de retorno en el intervalo de 60 á 170 kA, dependiendo de la relación carga-corriente utilizada. Por el contrario, este valor de 45 m/10 kA es demasiado grande para los puntos que tienen una iniciación del líder o probabilidad de impacto muy alta.

La ventaja que se le adjudica al método de la esfera rodante (RSM) es la facilidad de su aplicación. Esto es cierto para estructuras sencillas, pero en el caso de estructuras con formas complejas es casi imposible aplicarlo manualmente, necesitándose entonces de un software de modelación en 3D. Sin embargo, debido a que es una simplificación del proceso físico de conexión del rayo con la estructura, tiene algunas limitaciones. Su deficiencia fundamental radica en que



APCI

asigna una habilidad de iniciación del líder igual para todos los puntos de contacto con la estructura (no distingue entre puntos de conexión del rayo probables y no probables) al no tomar en cuenta la influencia de los campos eléctricos en la iniciación de los trazadores. O sea, para una corriente pico de retorno dada, la distancia de impacto ds es un valor constante. Esta simplificación puede conducir a un diseño sobredimensionado cuando los puntos de la estructura, que presentan una intensificación significativa del campo eléctrico, están fuera de la zona de protección definida por la esfera. Esta simplificación se debe al origen del propio método (protección de las líneas de transmisión de energía eléctrica), donde los parámetros de diámetros y alturas son uniformes. Realmente, el rayo impacta preferentemente en las esquinas y los bordes de la cubierta plana de un edificio respecto a su centro o la mitad inferior de las superficies laterales.

Si se supone que la esfera rueda de manera tal que su centro se desplaza a una velocidad lineal constante puede obtenerse indicaciones cualitativas de la probabilidad de contacto del rayo con cualquier punto particular del edificio. El tiempo que dicha esfera permanece sobre ese punto del edificio ofrece una medida cualitativa de la probabilidad de que sea impactado. Por lo tanto, para un edificio sencillo de forma rectangular con cubierta plana, el tiempo de demora será grande en las esquinas y bordes y pequeño en cualquier otro punto de la parte plana de la cubierta, indicando correctamente que la probabilidad de impacto en los primeros es mayor que en los segundos.

Existen razones teóricas para creer que sólo las descargas con baja I_p y, consecuentemente, con bajos valores de ds puedan penetrar por debajo del nivel de la cubierta de un edificio e impactar en los laterales. Debido a esto, las consecuencias de un impacto en los laterales de un edificio podrían producir daño de menor envergadura. A menos que haya razones específicas para la protección lateral, como sería el caso de una estructura que contiene explosivos, normalmente se considera que el costo de ésta no se justifica.

A pesar de las deficiencias teóricas de este método, se ha demostrado que hasta el momento es el mejor procedimiento aprobado para el diseño de los sistemas de captura. Aunque el radio no puede determinarse sobre bases teóricas, la experiencia permite asumir valores entre 20 y 100 m. Los radios más pequeños representan un efecto de protección mayor que debe usarse en los casos de mayor riesgo.



Posicionamiento del sistema de captura.

Aplicando este método, el posicionamiento de los captadores es adecuado si ningún punto de la estructura a proteger hace contacto con la esfera de radio R . De esta manera, la esfera sólo toca el sistema de captura.

Criterio de intercepción			LPL			
	Símbolo	Unidad	I	II	III	IV
Corriente pico mínima	I	kA	3	5	10	16
Radio de la esfera rodante	R	m	20	30	45	60

Tabla 1 Valores mínimos de la corriente del rayo y radios de la esfera rodante para cada LPL, según IEC 62305.

Como puede verse el radio de la esfera rodante depende del nivel de protección contra rayo (LPL) requerido para la estructura en cuestión.

La norma NFPA 780 especifica radios de la esfera rodante de 45 m (150 ft), para estructuras ordinarias, y de 30 m (100 ft), para estructuras con riesgo de incendio o explosión especiales.

El radio de protección (r) es por tanto igual a:

$$r = \sqrt{d_s^2 - (d_s - h)^2} = \sqrt{h(2d_s - h)}$$

donde:

d_s distancia de impacto =radio de la esfera rodante R

h altura relativa del captador

Cuando se aplica el RSM a un edificio de altura mayor que el radio seleccionado de la esfera, ésta toca los bordes verticales de los laterales del edificio por encima de una altura igual al radio de la esfera. Esto indica la posibilidad de impactos en los laterales del edificio y, por tanto, la necesidad de colocar captadores en estas localizaciones. Los estudios demuestran que aunque ocurren impactos laterales en los bordes verticales de edificios altos, la probabilidad de estos decrece rápidamente con la altura del punto de impacto medida desde el terreno.

Para estructuras con altura inferior a 60 m, esta probabilidad de descargas laterales es despreciable y para altura superior a 60 m, la mayoría de las descargas golpearán la cubierta, los bordes horizontales y las esquinas de la estructura. Sólo un pequeño porcentaje de las descargas serán en los lados de la estructura. Por ello, debe considerarse la instalación de captadores laterales en la parte más alta (típicamente en el 20 % superior de la altura de la estructura). En este caso, para el

posicionamiento del sistema de captura de la parte superior de la estructura solo será aplicable el método de la esfera rodante.

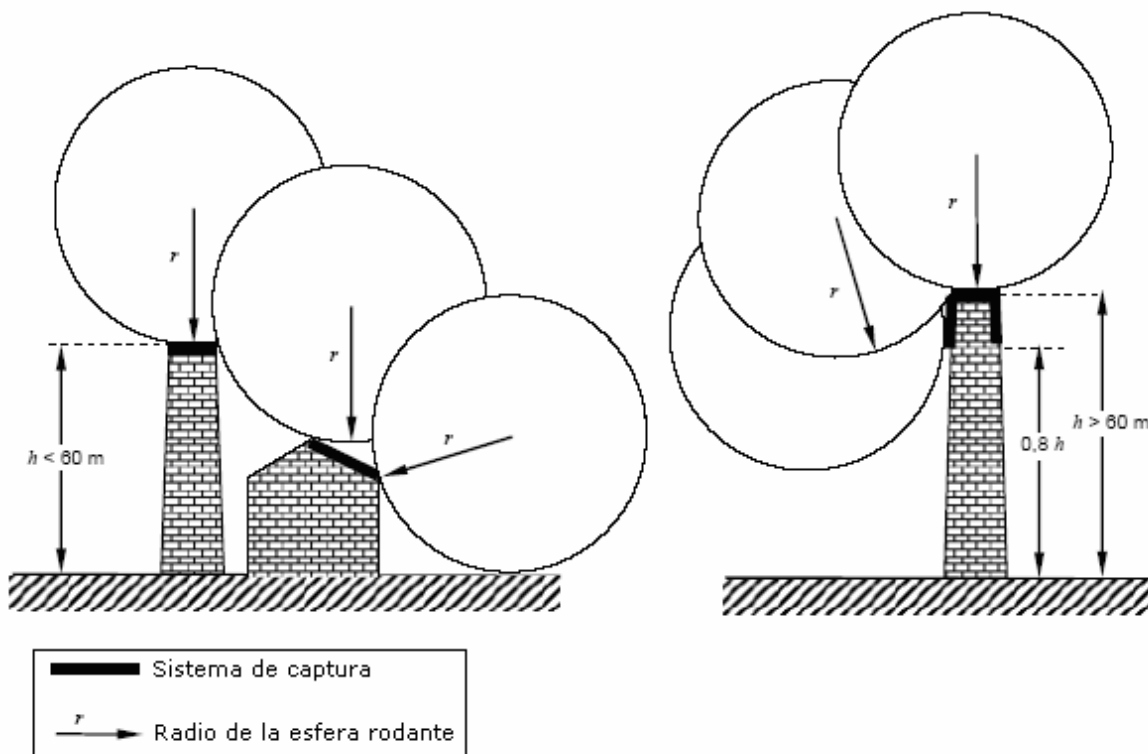


Fig. 3 Posicionamiento del sistema de captura utilizando el método de la esfera rodante

Método de la malla

Consiste en establecer una malla rectangular de conductores.

El volumen protegido por conductores combinados en forma de malla está definido por la combinación de los volúmenes de protección que determinan los conductores individuales que componen la malla.

Se considera que este es un método eficiente para la protección superficies planas, o sea, de cubiertas planas horizontales e inclinadas sin curvatura y las superficies planas laterales contra descargas laterales.

Posicionamiento del sistema de captura.

Para su correcta ubicación deben satisfacerse las siguientes condiciones:

a) Los conductores tienen que posicionarse por encima de las líneas de bordes, de las proyecciones y de las líneas de caballete de la cubierta, si la pendiente de la misma excede $1/10$. En este caso pueden usarse conductores paralelos en lugar de



la malla, si se garantiza que la distancia entre los conductores no sea mayor que el ancho de malla requerido.

b) Las dimensiones de la malla captadora no serán mayores que los valores especificados para cada nivel de protección contra rayo.

c) El sistema de captura se construye de manera tal que la corriente del rayo siempre encuentre como mínimo dos trayectos metálicos distintos hacia el sistema de puesta a tierra.

d) No habrá instalaciones metálicas que sobresalgan del volumen protegido por los sistemas captadores.

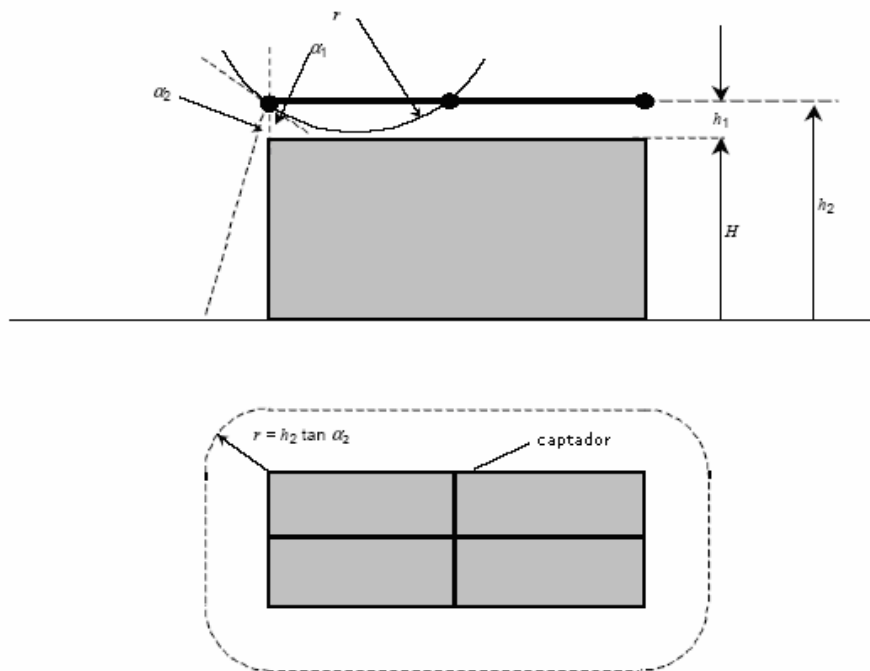


Fig. 4 Posicionamiento del sistema de captura utilizando el método de la malla

Nivel de Protección contra Rayo (LPL)	I	II	III	IV
Dimensiones máximas de la retícula (m)	5 x 5	10 x 10	15 x 15	20 x 20

Modelos recientes

Como los métodos de diseño de sistemas de protección contra rayo actuales no son capaces de diferenciar entre los puntos de la estructura con probabilidades de iniciación del líder alta y baja, es necesario de desarrollar un método con mayor fundamento físico que tenga en cuenta este efecto. De esta manera, podrán diseñarse sistemas de protección contra rayo más confiables y eficaces.

Los estudios posteriores más importantes que han evolucionado de modo certero hacia un método de diseño con bases físicas son: el *Modelo de Progresión del Líder*

(Dellera & Garbagnati 1990, Bernardi et al 1996) y la *Teoría de Inicio del Líder* (Rizk 1989, 1990, 1994). Ambos fueron incluidos en el informe de comité del CIGRE de 1997 sobre interceptación del rayo. Este comité se dio a la tarea de informar al IEC TC81 sobre la existencia de mejores métodos de diseño de sistemas de protección contra rayo, pero hasta ahora, ninguno ha sido incluido en la norma IEC de protección contra rayo.

Método del Volumen de Colección

Desarrollado por Ericsson 1989. Por el contrario al del ángulo de protección, este método basa sus parámetros de diseño en la altura de la estructura, la intensificación del campo eléctrico en las proyecciones de la estructura, la carga del líder y las velocidades relativas de propagación de los líderes que se interceptan. El modelo puede desarrollarse para estructuras tridimensionales y ofrece una aproximación bastante exacta de diseño de sistema de protección.

Carga del líder (Q)	Corriente pico (I)	Probabilidad de exceder el valor I	Nivel de Protección
0,5 C	6,5 KA	98%	Alto
0,9 C	10 KA	93%	Medio
1,5 C	16 KA	88%	Normal

Tabla 2 Probabilidad estadística de que el líder descendente exceda la corriente pico indicada

La figura ilustra un líder descendente que se aproxima a un punto aislado en el terreno. Alrededor de ese punto se establece una distancia de impacto semiesférica. El radio depende de la carga en el extremo del líder y corresponde a la distancia donde la intensidad del campo eléctrico excede el valor crítico. O sea, la intensidad de campo adecuada para lanzar un líder de interceptación ascendente.

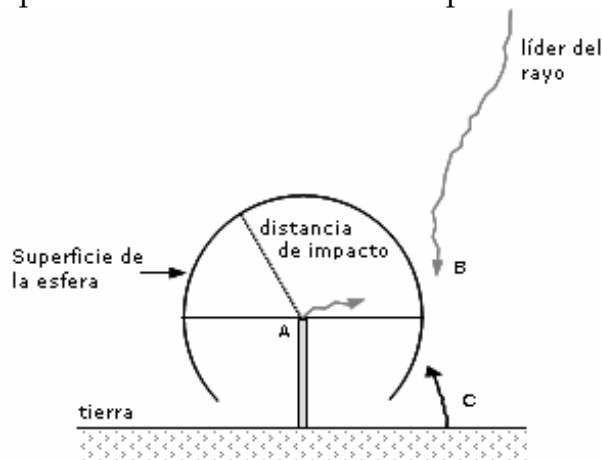


Fig. 5 Superficie esférica con radio de Distancia de Impacto en el punto A



APCI

La distancia de impacto semiesférica revela que los líderes descendentes con una carga eléctrica débil se aproximan mucho más a un punto del terreno antes de lograr las condiciones críticas para la iniciación del líder ascendente. Mientras mayor es la magnitud de la carga, mayor es la distancia entre el líder y el punto del terreno a la cual se logran las condiciones críticas. Con fines de diseño puede seleccionarse un radio de la semiesfera que corresponda con el nivel de protección deseado. Este método tiene en cuenta las velocidades relativas de los líderes ascendente y descendente. No todos los líderes que penetran a la semiesfera progresarán hasta la intercepción. Los líderes que entran a la parte exterior de la semiesfera probablemente continuarán su movimiento descendente y serán interceptados por un líder ascendente diferente (emitido desde una estructura aledaña o una prominencia del terreno). Esto lleva al desarrollo de una parábola de limitación. El volumen que esta encierra se conoce como Volumen de Colección. Si un líder descendente entra a este volumen su intercepción es segura. A continuación se muestra cómo la parábola de velocidad limita las dimensiones de dicho volumen.

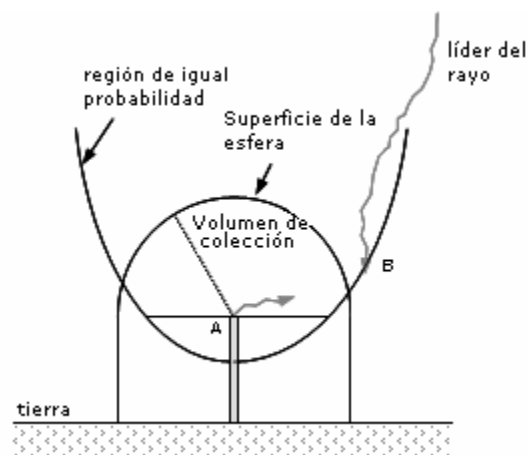


Fig. 6 Volumen de Colección formado por los sitios de igual probabilidad y la superficie semiesférica de distancia de impacto

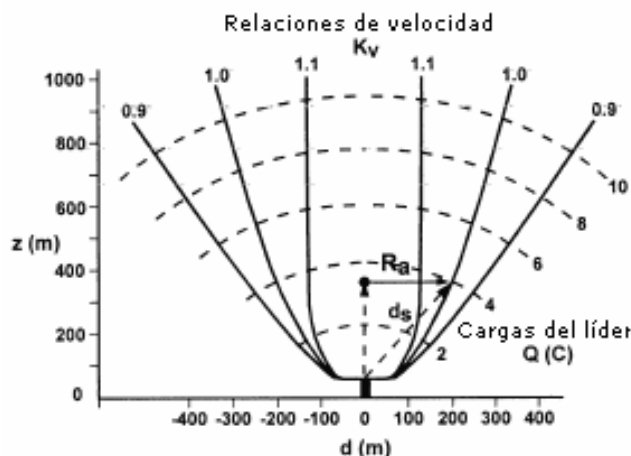


Fig. 7 Volúmenes de colección para una estructura de 30 m, con diferentes cargas del líder descendente y relaciones de velocidad

El diseño con los volúmenes de colección usando los parámetros estadísticos del rayo proveerá a los diseñadores de un mejor análisis de riesgo. Las magnitudes de estos volúmenes se determinan de acuerdo con la corriente pico. Es decir, si desea un Nivel de Protección Alto se selecciona una corriente pico de 6,5 KA, pues el 98% de todos los rayos exceden este valor. Las descargas de mayor magnitud tendrán volúmenes de colección más grandes que crean un mayor solapamiento del área de captura de los terminales. Un diseño realizado para un nivel alto no significa que los rayos con una magnitud menor que esa no serán interceptados sino que, sencillamente, existe la probabilidad de que alguno no pueda ser interceptado por un líder ascendente que emana desde el interior del volumen de colección.

El modelo del Volumen de Colección asume que todos los puntos de la estructura son puntos potenciales de impacto y como tal tienen volúmenes de colección naturales.

Los bordes y esquinas exteriores en la parte más alta de un edificio o estructura y especialmente sus partes protuberantes son probablemente las que tengan campos eléctricos locales más altos que en otros sitios, y por tanto son los lugares probables para la iniciación de los líderes ascendentes. Consecuentemente, los puntos de impacto de rayo más probable en un edificio son los bordes, esquinas y otras partes protuberantes en la vecindad del líder descendente. Debido a esto, si los captadores están ubicados en todos los sitios donde los campos eléctricos son altos y son probables las iniciaciones del líder, habrá una alta probabilidad de que la descarga sea interceptada exitosamente. Estos campos no serán tan altos en las superficies planas y consecuentemente serán menos probables de ser impactados.

Como los volúmenes de colección de los captadores mejorados son mayores en la estructura se requerirá menor cantidad de estos captadores. Estos tienen que ubicarse de manera tal que sus volúmenes de colección solapen los pequeños volúmenes de colección naturales de las proyecciones de la estructura.

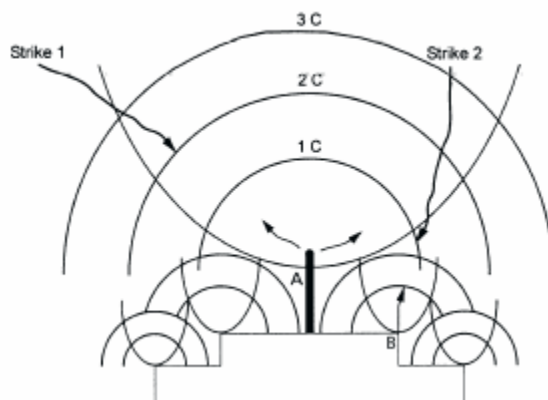


Fig. 8 Concepto de diseño del Volumen de Colección

REFERENCIAS:

- "Lightning". M. A. Uman, Dover Publications, New York.
- "A review of the lightning attachment process and requirements to achieve improved modelling", J.R. Gumley and G. Berger.
- "Interception of a lightning stroke", C. Menemenlis, University of Patras, Greece.
- "An analysis of advanced lightning collection technology", M.M. Drabkin and R. B. Carpenter.
- "A modern perspective on direct strike lightning protection", F. D'Alessandro.
- NFPA-780 "Standard for the Installation of Lightning Protection Systems" 2008 Edition, publicado por NFPA, USA.
- IEC 62305: 2006 "Lightning Protection"