Deducción De Las Ecuaciones Que Permitan Determinar La Ubicación segura de Un Conjunto De Pararrayos En Edificaciones o Estructuras con Cúpula Semiesférica Utilizando El Método De La Esfera Rodante.

Por: Ing. Jairo Mora Martínez*
jairomor@gmail.com
Barranquilla – Colombia
Enero 11 de 2020
*Ingeniero electricista de la Universidad de la costa en Barranquilla - Colombia

Resumen

En el campo de la protección eléctrica existe un método de protección eléctrica de edificaciones contra descargas atmosféricas (Protección contra rayos) denominado método electrogeométrico o el método de la esfera rodante; hasta el momento el método de la esfera rodante es implementado gráficamente, es decir, graficando las condiciones de protección sobre planos escalados mas no de forma analítica y para un ingeniero es necesario el contar con un modelo matemático que le permita, mediante cálculos específicos, determinar el comportamiento de un sistema de protección antes de su implementación sin preocuparse por las limitantes de escala o planimetría. Por esta razón el presente trabajo pretende el crear un conjunto de ecuaciones que le permitan a los ingenieros electricistas el calcular la topología de un sistema de protección contra descargas atmosféricas (rayos) que permita la verificación matemática y grafica de su diseño.

Palabras calve: ecuación, Rayo, Descarga, Protección.

Abstract

In the field of electrical protection there is a method of electrical protection of buildings against atmospheric discharges (Lightning Protection) called the electrogeometric method or the rolling sphere method; So far the rolling sphere method is implemented graphically, that is, graphing the protection conditions on scaled planes but not analytically and for an engineer it is necessary to have a mathematical model that allows, through specific calculations, to determine the behavior of a protection system before its implementation without worrying about the limitations of scale or planimetry. For this reason, the present work aims to create a set of equations that will allow electrical engineers to calculate the topology of a protection system against atmospheric discharges (lightning) that allows the mathematical and graphic verification of their design.

Keywords: equation, Lightning, Discharge, Protection.

INTRODUCCIÓN

Al momento de realizar el apantallamiento o la protección contra descargas atmosféricas (Rayos) de una edificación, es muy común el instalar pararrayos tipo franklin en las esquinas de las edificaciones con sus respectivos bajantes cuyo objetivo es proteger dicha edificación del impacto de los rayos. Pero no se tiene una claridad del área que está protegida dentro de la zona encerrada por los pararrayos.

Con el presente análisis geométrico se pretende determinar las ecuaciones de los diferentes casos que se pueden encontrar en este tipo de apantallamiento aplicando el método electro geométrico más conocido como el método de la esfera rodante para conocer clara y precisamente el área de protección segura bajo los pararrayos.

MÉTODO ELECTRO GEOMÉTRICO

Dependiendo del continente y del país en el que se realice el diseño, se pueden encontrar diferentes formas de realizar el diseño y el cálculo del apantallamiento, pero sea cual sea el método utilizado, en general, todos se basan en la distancia recorrida por el trazador hasta hacer contacto con la descarga descendente para determinar el área protegida.

Este distancia recorrida por el trazador del rayo se determina teniendo en cuenta el nivel de riesgo de la estructura a sufrir un impacto por en rayo; dicho nivel de riesgo puede calcularse ya sea con la norma IEC 62305-2, la NTC 4552-2 o cualquier norma similar a estas que permita determinarlo.

Basados en la norma técnica NTC 4552 (primera actualización) es posible expresar que la técnica usada para analizar la acción de las descargas en objetos a tierra es el modelo electro geométrico desarrollado originalmente por Golde R.H, tiene su aplicación en el estudio del apantallamiento que proveen varillas verticales y conductores horizontales.

Considerando la tensión de ruptura dieléctrica de grandes espacios interelectrodicos, se ha establecido con estos conceptos una ecuación empírica dependiente de la corriente de retorno del rayo imax, de la que depende rsc. Que es el radio de una espera que gira entorno a la punta captadora generando un área de protección de revolución.

La ecuación que define este radio está dada en la NTC 4552 por:

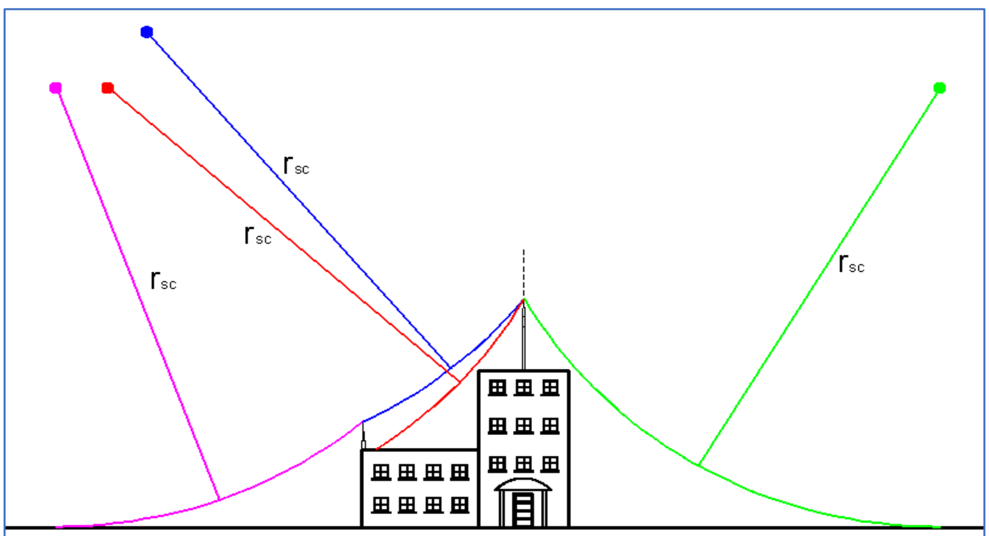


Figura 1. Esquema del modelo electro geométrico

$$r_{sc} = 2.i_{max} + 30\left[1 - e^{-\frac{i_{max}}{6.8}}\right] \quad (\text{metros})$$

Donde **rsc** es el radio de la esfera giratoria alrededor de la Terminal captadora.

Esta expresión puede ser simplificada de la siguiente manera:

$$r_{sc} = 10.(\, i_{max}\,)^{0.65} \quad (\text{metros})$$

De acuerdo a lo establecido en la norma NTC 4552-2, en la tabla 1 se muestra el radio de la esfera de protección rsc según el nivel de riesgo calculado para la edificación:

Tabla 1		
Nivel de Riesgo	**r_{sc} (m)**	**r_{sc} (ft)**
Nivel I	35	115
Nivel II	40	131
Nivel III	50	164
Nivel IV	55	180

En la práctica, para determinar gráficamente la altura mínima de los dispositivos de protección o interceptación, se trazan arcos de circunferencia con radio igual a la distancia de impacto rsc, entre los objetos a ser protegidos y los dispositivos de interceptación (por ejemplos dispositivos tipo franklin), de tal forma que sean tangentes a la tierra y a los objetivos que conformen el arco, y cualquier objeto que sea tocado por el arco estará expuesto a descargas directas.

En la **figura 1** se muestra el concepto del modelo electro geométrico.

MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE

El método de la esfera rodante es un corolario del método electro geométrico, este método consiste en imaginar una esfera de radio igual a la distancia de impacto rodando sobre los volúmenes de las estructuras a proteger contra rayos.

Este radio **rsc** es calculado de la misma manera que en el método electro geométrico, aunque es muy común tomar un radio de 150 pies o 45.72 metros.

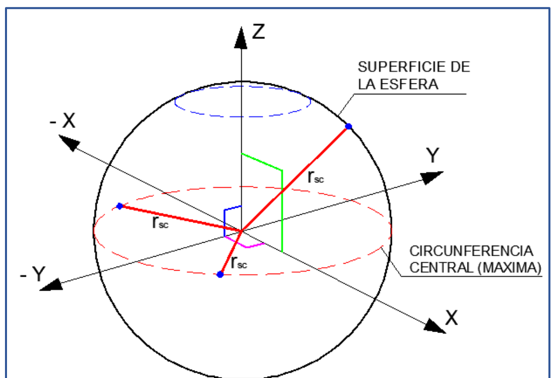


Figura 2. Corte transversal de una esfera, que describe una circunferencia

En la **figura 3** es posible ver como se hace rodar una esfera sobre toda la estructura de un tanque de almacenamiento de líquidos, esta esfera debe rodar haciendo contacto solo en las puntas de los terminales de

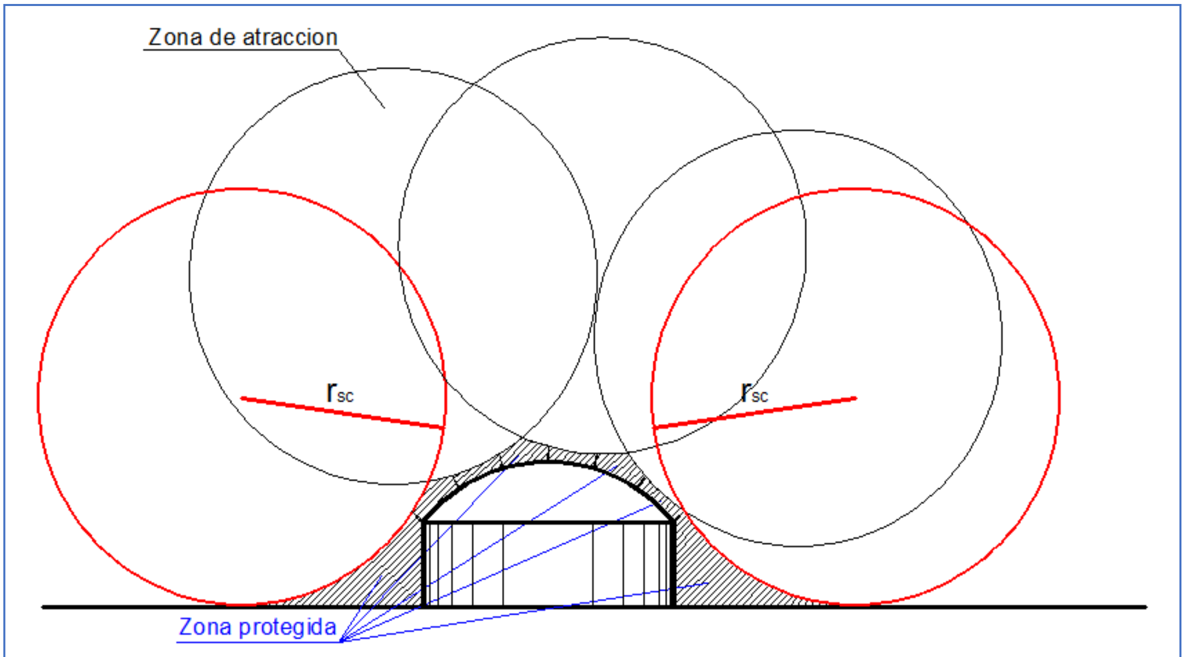


Figura 3. Esquema del método de la esfera rodante

captación y final mente terminar en el suelo sin hacer contacto con la estructura, creando así, un área de protección que cubre completamente la edificación. El método de la esfera rodante no solo debe aplicarse a lo largo de la edificación sino que también debe aplicarse a lo ancho de la estructura a proteger.

Este tipo de método se emplea de forma gráfica, sobre planos, pero este trabajo se propone encontrar un modelo matemático consistente en un conjunto de ecuaciones que le permitan al ingeniero electricista el diseño de apantallamientos por el método de la esfera rodante utilizando tan solo la geometría analítica, la trigonometría y el cálculo algebraico. Y de esta manera sea capaz de determinar el tamaño del área protegida bajo la esfera y en qué posición deben estar ubicados los pararrayos para cubrir un área determinada que cumpla con las condiciones requeridas por el diseñador.

En el presente trabajo se analizaran los diferentes casos que se presentan en la realidad al momento de diseñar un apantallamiento, esto con el fin de encontrar un conjunto de ecuaciones que permita calcular analíticamente cada una de las variables tenidas en cuenta al momento de diseñar.

Considerando que la esfera rodante cuenta con una circunferencia de diámetro máximo desde el centro de la misma que rodea todo el ecuador de la esfera, los cálculos se simplificaran al tomar esta circunferencia como base de cálculo ya que al hacer contacto con alguna de las puntas captadoras lo hará en un punto que en algún momento será el diámetro máximo. Esta simplificación no hará que pierda efectividad el método ya que la esfera desde su centro hasta cualquier punto de la superficie esférica tendrá un radio de "r_{sc}".

CASO 1: ESFERA QUE SE DESPLAZA ENTRE EL SUELO Y UNA PUNTA DE CAPTACIÓN

Al analizar este caso se puede observar que existen tres puntos físicos fundamentales en este sistema, el centro de la esfera, el punto donde la esfera toca el suelo y el punto en el que la esfera hace contacto con el pararrayos. Es posible observar estos puntos claramente en la **figura 4.**

coloca el eje coordenado del sistema y final mente, el punto P, que se encuentra en la punta de la Terminal captadora con coordenadas P = (L1, [h1+h2]) en donde L1 es la distancia de separación entre el punto D (punto donde la esfera toca el suelo) y la edificación; h1 es la altura de la edificación y h2 es la altura de la punta captadora. En la **figura 5** es posible ver estos puntos con más claridad.

La ecuación bidimensional de la esfera está dada por:

$$(X - a)^2 + (Y - b)^2 = r^2 \quad (1)$$

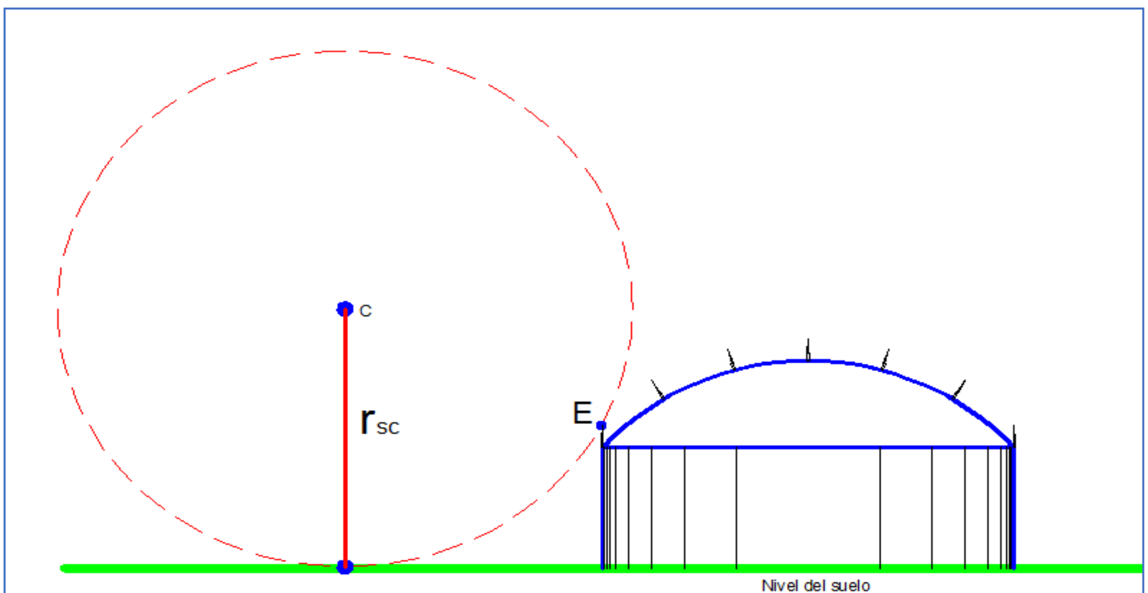


Figura 4. Caso de Análisis No. 1 Suelo y Terminal de Captación

Al ubicar el eje de coordenadas en una posición que sea conveniente para el cálculo analítico, es posible ver que el centro de la esfera C tiene coordenadas C = (0, $r$sc); el otro punto de análisis es el punto en el que la esfera rodante toca el suelo, este punto tiene las coordenadas D = (0,0) ya que es en este punto donde se

En donde "a" es la coordenada X del centro, "b" es la coordenada Y del centro y "r" es la magnitud de $r$sc según sea el nivel de riesgo calculado.

Al reemplazar el punto C que es el centro de la circunferencia, la ecuación (1) se convierte en:

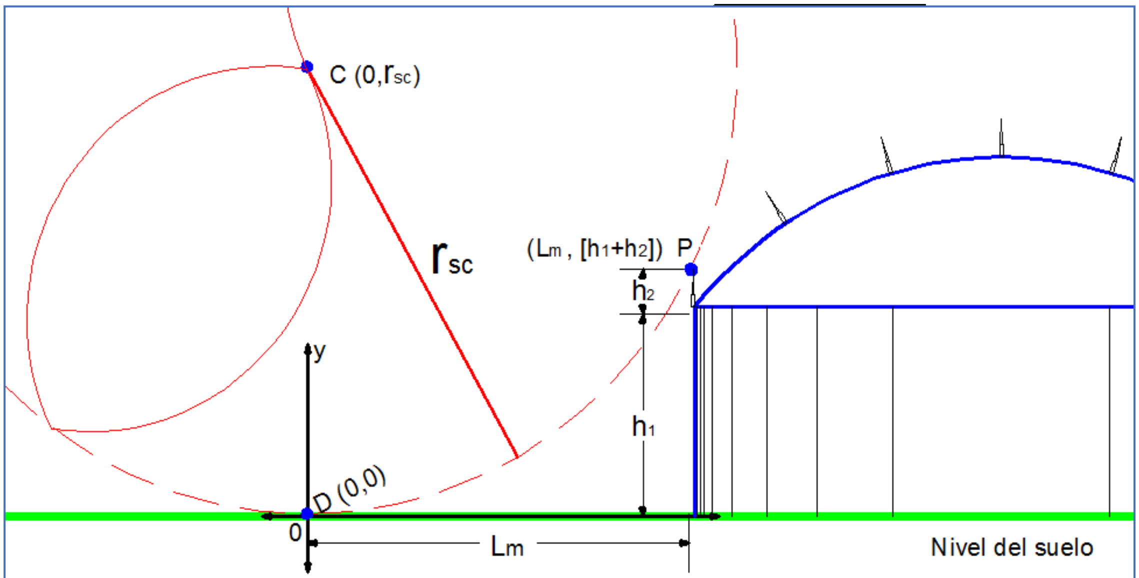


Figura 5. Coordenadas de los puntos de análisis del caso No. 1

$$(X - 0)^2 + (Y - r_{sc})^2 = r_{sc}^2 \quad (2)$$

O lo que es lo mismo:

$$X^2 + (Y - r_{sc})^2 = r_{sc}^2 \quad (3)$$

La ecuación (3) será la ecuación que se utilizara para determinar las zonas y valores de seguridad, en este caso del apantallamiento, como esta ecuación es la de la circunferencia que pasa por los puntos que conforman la topología del problema es posible determinar cualquier coordenada (x,y) que pertenezca a dicha circunferencia.

Al despejar la ecuación (3) para X se tendrá la siguiente expresión:

$$X = \sqrt{2 Y r_{sc} - Y^2} \quad (4)$$

Y al despejar le ecuación (3) para Y se tendría la siguiente expresión:

$$Y = r_{sc}^{2} - X^{2} + r_{sc} \quad (5)$$

Con las ecuaciones (4) y (5) es posible calcular los puntos (x,y) que pertenecen a la circunferencia y con ellos es posible determinar los parámetros de seguridad o las distancias mínimas que deben tenerse en cuenta en esta zona de la edificación.

DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE IMPACTO EN TIERRA.

El punto de impacto en tierra es el punto del suelo cercano a la edificación que tiene más probabilidades de ser impactado por un rayo al aplicar el método de la esfera rodante.

Este punto es el punto D que se muestra en la **figura 5**, y es posible calcular a qué distancia de la edificación es más probable que impacte un rayo empleando la ecuación (4).

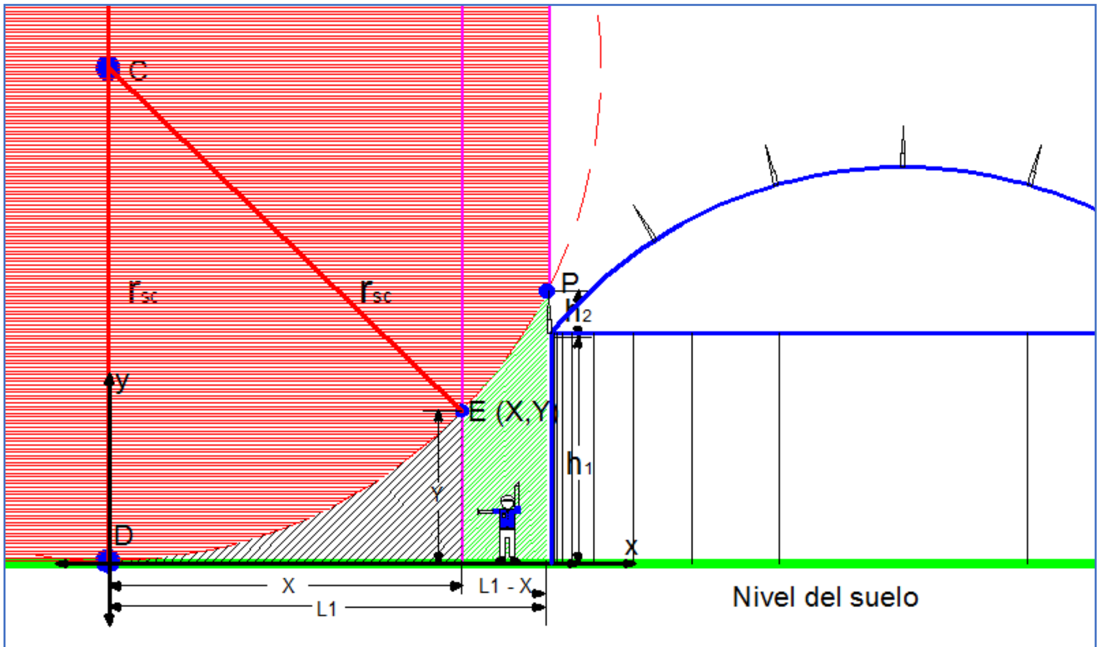


Figura 6. Coordenadas de cualquier punto (x,y) en el caso No. 1

Al reemplazar las coordenadas del punto "P" en la ecuación (4) se obtiene una ecuación que permitirá calcular la distancia entre la estructura y el punto más probable de impacto; reemplazando estas coordenadas se tendría:

$$\mathbf{Lm} = \sqrt{2\,[h1+h2]\; r_{sc} - [h1+h2]^2} \qquad \mathbf{(6)}$$

En donde:

Lm: es la distancia del edificio al punto más probable de impacto en el suelo.

h1: es la altura de la edificación a proteger

h2: es la altura o el tamaño del pararrayos seleccionado

CALCULO DE LA SEPARACIÓN DE DISEÑO:

Luego de determinar la separación máxima de impacto se debe calcular la separación de diseño; esta separación es la separación física segura entre la edificación donde está instalado el pararrayos (puntas captadoras) y un punto más cercano a la edificación que el punto de impacto.

Para el cálculo de la separación de diseño "Ld" se introducirá un nuevo factor que será llamado factor de seguridad que se representara por "fs". El factor de seguridad "fs" es el porcentaje que se podrá incrementar la separación de diseño "Ld" antes de alcanzar la separación de impacto "Lm". Para determinar "Ld" se tiene que:

$$\mathbf{Ld\,(\,1 + fs\,) = Lm}$$

En donde $0 < fs < 1$.

De la ecuación anterior es posible despejar la separación de diseño "Ld", y se obtienen que:

$$L_d = \frac{L_m}{(1 + fs)} \quad (7)$$

DETERMINACIÓN DE LA SEPARACIÓN PROTEGIDA:

Como separación protegida se entiende la separación que existe entre la edificación y el punto de la separación de diseño que se obtiene de la expresión:

$$L_s = L_m - L_d$$

DETERMINACIÓN DE LA ALTURA PROTEGIDA:

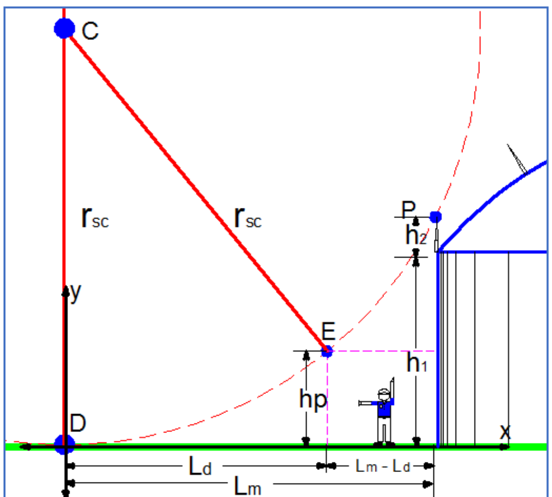


Figura 7. Altura protegida hp.

La altura protegida "h_p" es la separación que existe entre el suelo y la esfera rodante en un punto determinado cuando hace contacto en tierra y el pararrayos (punta captadora).

En la **figura 7** es posible observar esta altura como "h_p".

En la **figura 7** se puede ver que:

$$X = Ld$$

Para calcular la altura protegida "h_p" se reemplaza la coordenada "X" de la ecuación anterior en la ecuación (5), quedando dicha ecuación de la siguiente manera:

$$h_p = -\sqrt{r_{sc}^{\,2} - (Ld)^2} + r_{sc} \quad (8)$$

En donde "r_{sc}" es el radio de la esfera determinado con el cálculo del nivel de riesgo.

DETERMINACIÓN DE LA ZONA SEGURA:

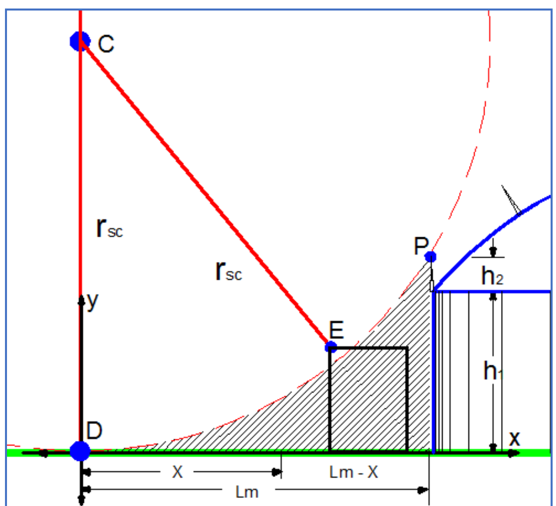


Figura 8. Estructura No Protegida

Al calcular **Lm** ya es posible junto con las ecuaciones (4) y (5) determinar cualquier coordenada de la circunferencia mostrada en la **figura 6**. De tal manera que se puede determinar si una zona de un ancho o altura específica junto a la edificación está protegida. Para ilustrar la importancia de la zona de seguridad protegida por el apantallamiento se muestra la **figura 8** donde es posible observar un elemento ubicado junto al edificio apantallado; este elemento puede ser cualquier elemento, un tanque de almacenamiento de agua o de combustible, una antena, un silo, etc.

En la **figura 8** es posible observar como una zona de la estructura ubicada al lado de la edificación queda por fuera de la zona de protección lo que la pone en riesgo de impacto. El punto "E" es el punto de la estructura más expuesto a impacto y es necesario ampliar la zona de protección para que cubra completamente tanto a la edificación como a la estructura que tiene a su lado.

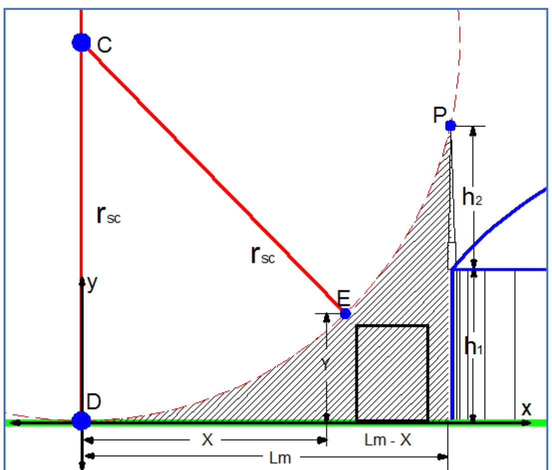


Figura 9. Estructura Protegida

La ampliación de esta zona se consigue aumentando la altura del pararrayos, lo que ocasiona que la esfera retroceda alejándose del edificio ampliando el área protegida cubriendo completamente el elemento ubicado junto al edificio.

En la **figura 9** se puede ver como al aumentar la altura del pararrayos se desplaza la esfera y cambia la ubicación del punto E haciendo contacto con la esfera y dejando el objeto protegido dentro de la zona segura.

CASO 2: ESFERA QUE ESTA SOPORTADA SOBRE DOS PUNTOS UBICADOS SOBRE UNA SUPERFICIE CURVA.

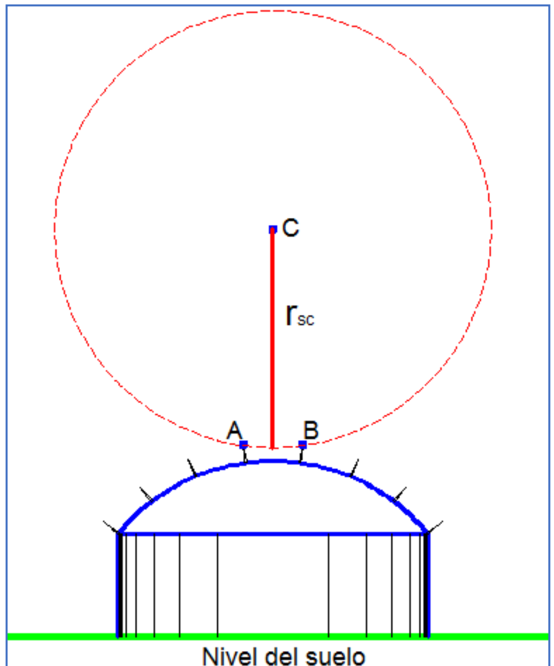


Figura 10. Esfera soportada sobre dos pararrayos en superficie curva.

El caso 2 se muestra claramente en la **figura 10**, consiste en dos pararrayos que se encuentran separados entre sí por una distancia curva en forma de arco; ambos pararrayos tienen la misma altura y hacen contacto en los puntos A y B con una esfera de centro en C y de radio r_{sc}.

DETERMINACIÓN DEL CENTRO DE LA ESFERA QUE CONTIENE LA SUPERFICIE DE LA CUBIERTA O CÚPULA DE LA ESTRUCTURA:

El proceso de determinación de las ecuaciones inicia con la determinación del centro de la esfera que contiene la cúpula de la estructura. Este paso es importante ya que es en este centro en donde se pondrá el eje de coordenadas de simetría para el análisis del conjunto de la cúpula y la esfera rodante.

La determinación de este centro puede realizarse aplicando cualquiera de los métodos existentes para la determinación de la ecuación de una circunferencia de la cual se conocen tres puntos.

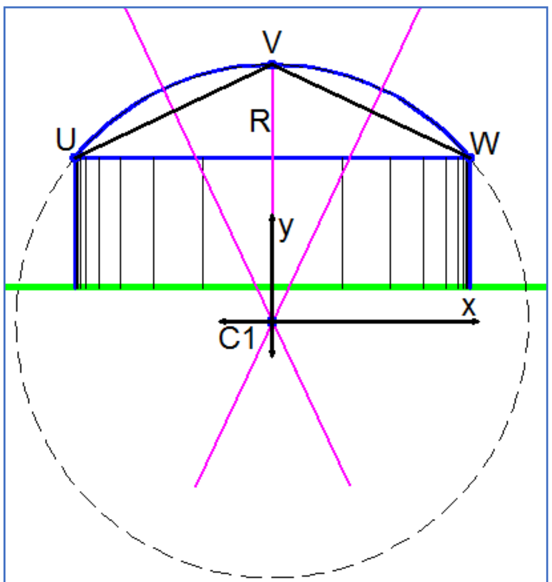


Figura 11. Centro de la esfera que contiene la superficie de la cúpula.

Es posible aplicar estos métodos ya que se conocen las dimensiones de la estructura previamente antes de iniciar el cálculo.

Y con estos tres puntos (U, V, W) se puede calcular el centro C1 y utilizarlo como el centro del eje de coordenadas del análisis del sistema.

Puede emplearse cualquier método, el método de la matriz de valores, el método de las cuerdas, o el método de las rectas perpendiculares que se cruzan en el centro. En este trabajo se empleara este último para determinar el centro de la esfera que contiene la cúpula en el ejemplo de aplicación, para tener una claridad de cada uno de los pasos.

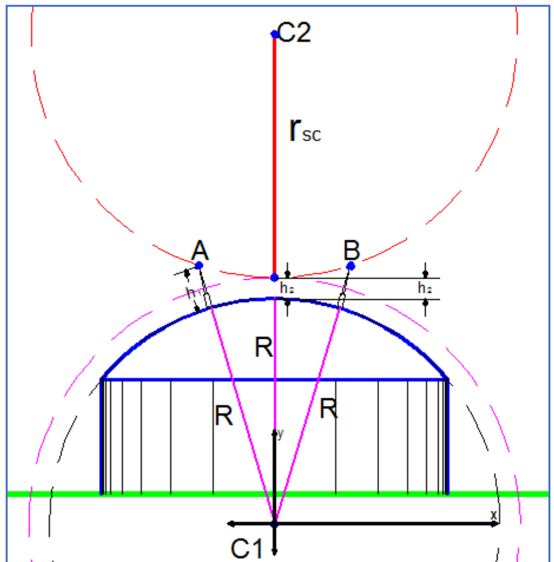


Figura 12. Ubicación de los puntos de análisis del caso 2.

Como se puede ver en la **figura 12**, el eje de coordenadas permite tener una identificación clara de los centros de las dos esferas y sus circunferencias representativas.

Se tiene que el centro de la esfera que contiene la superficie de la cubierta de la estructura es C1 = (0 , 0 , 0); y el de su circunferencia representativa es

$$C1 = (0 , 0)$$

y su radio es R. Por otra parte, el centro de la esfera rodante C2 tiene coordenadas

$C2 = (0 , [R + h_2 + r_{sc}] , 0)$ y las coordenadas de su circunferencia representativa es:

$$C2 = (0 , [R + h_2 + r_{sc}])$$

Ahora bien, la ecuación bidimensional de la esfera está dada por la ecuación (1) como se mostró anteriormente que es:

$$(X - a)^2 + (Y - b)^2 = r^2 \quad (1)$$

En donde "a" es la coordenada X del centro, "b" es la coordenada Y del centro y "r" es la magnitud del radio.

Al reemplazar el punto C1 que es el centro de la circunferencia que contiene la superficie de la cubierta de la estructura, la ecuación (1) se convierte en:

$$(X - 0)^2 + (Y - 0)^2 = R^2 \quad (9)$$

O lo que es lo mismo:

$$\boxed{X^2 + Y^2 = R^2 \qquad (10)}$$

Al reemplazar el punto C2 que es el centro de la circunferencia que contiene la esfera rodante, la ecuación (1) se convierte en:

$$(X - 0)^2 + (Y - [R+h_2+rsc])^2 = r_{sc}^2 \quad (11)$$

O lo que es lo mismo:

$$\boxed{X^2 + (Y - [R+h_2+rsc])^2 = r_{sc}^2 \quad (12)}$$

Estas ecuaciones serán las ecuaciones que se utilizaran para determinar las zonas y valores de seguridad en este caso de apantallamiento.

DETERMINACIÓN DE LA SEPARACIÓN DE IMPACTO EN LA ESTRUCTURA.

Luego de obtener las ecuaciones que describen la circunferencia en cada uno de sus puntos es posible iniciar la determinación de los diferentes componentes desconocidos del sistema.

Un componente importante del cálculo de este caso es determinar la ecuación de la circunferencia cuando se presenta la separación máxima entre pararrayos es decir, determinar cuál sería la distancia máxima de separación entre pararrayos en la cual la esfera rodante haría contacto con la estructura protegida.

En la **figura 13** es posible observar este caso. Es de anotar que a diferencia de una superficie plana en donde se determina una separación lineal, en este caso es necesario determinar una separación angular y con esta, determinar la longitud del arco que separa los dos electrodos o puntas captadoras.

Si eliminamos la separación de protección h2, la circunferencia que demarca la esfera rodante desciende hasta que su centro se ubica en la coordenada C2 = (0 , [R + rsc]), y se utilizara una circunferencia auxiliar de radio r = (R + h1), que al interceptarse con

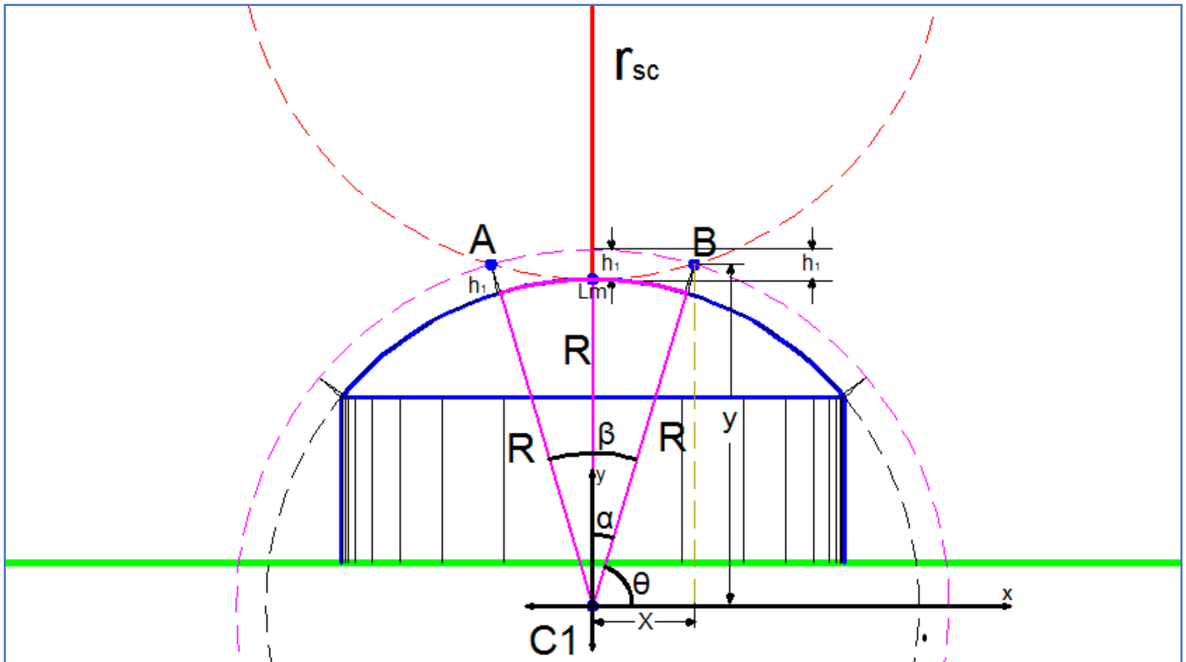


Figura 13. Esfera Rodante que hace contacto con estructura de forma semiesférica.

la circunferencia de la esfera rodante entregara los dos puntos de contacto que permitirán determinar el ángulo de separación.

En la **figura 13** es posible ver la conformación de este sistema.

Al reemplazar el punto C1 que es el centro de la circunferencia que contiene la superficie de la cubierta de la estructura y al sustituir su radio por el radio de la circunferencia auxiliar de radio (R + h1), la ecuación (1) se convierte en:

$$(X - 0)^2 + (Y - 0)^2 = (R+h_1)^2 \quad (12)$$

O lo que es lo mismo:

$$\boxed{X^2 + Y^2 = (R+h_1)^2 \qquad (13)}$$

Al reemplazar el punto C2 que es el centro de la circunferencia que contiene la esfera rodante, pero haciendo que la separación entre las circunferencias sea cero (h2 = 0), la ecuación (1) se convierte en:

$$(X - 0)^2 + (Y - [R+rsc])^2 = r_{sc}^2 \quad (14)$$

O lo que es lo mismo:

$$\boxed{X^2 + (Y - [R+rsc])^2 = r_{sc}^2 \quad (15)}$$

Estas ecuaciones serán las ecuaciones que se utilizaran para determinar la separación máxima “Lm” entre los electrodos y que se utilizara como referencia para determinar la separación segura.

En el diagrama es posible observar que las dos circunferencias hacen contacto en dos puntos específicos, los puntos A y B; como se puede observar, estos dos puntos son comunes a ambas circunferencias de tal manera que la coordenada x e y es común para las dos, por esta razón podemos obtener los valores de x e y de la intersección despejando el sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas.

En este caso se igualaran las ecuaciones 13 y 15 por el término X^2, y se obtiene como resultado que:

$$\boxed{(R+h_1)^2 - Y^2 = r_{sc}^2 - (Y - [R+rsc])^2}$$

Al resolver los trinomios y despejar se obtiene que:

$$\boxed{2y(R+rsc) = (R+h_1)^2 + (R+rsc)^2 - rsc^2}$$

Y al despejar y se obtiene que:

$$\boxed{Y = \frac{(R+h_1)^2 + (R+rsc)^2 - rsc^2}{2(R+rsc)} \quad (16)}$$

En donde:

R: es el radio de la esfera que contiene la superficie de la cúpula.

rsc: es el radio de la esfera rodante.

h_1: es la altura (el largo) del pararrayos que se desea utilizar.

Luego de obtener el valor de la coordenada "y" de los puntos de contacto de la esfera rodante con los pararrayos (los puntos A y B), es posible calcular las coordenadas de "X2 para estos dos puntos reemplazando el valor de "Y" obtenido en la ecuación (16) en la ecuación (13) y despejando "X2 de la misma de la siguiente manera:

$$\boxed{X = \sqrt{(R+h_1)^2 - Y^2} \quad (17)}$$

CALCULO DEL ANGULO DE SEPARACIÓN MÁXIMA β ENTRE ELECTRODOS:

Después de haber determinado las coordenadas "x" & "Y" de los puntos de contacto de la esfera rodante es posible utilizar estos puntos para determinar el ángulo de separación máxima entre electrodos.

Este ángulo es indispensable para calcular la separación máxima en esta configuración pues la separación entre electrodos no es lineal sino que es un arco que debe ser calculado.

Primero se calcula el ángulo que se encuentra entre el radio R y los ejes x & y, a este ángulo se le llamara θ; y está dado por:

$$\theta = \tan^{-1} (Y / X)$$

Y el ángulo complementario "α" está dado por:

$$\alpha = 90° - \theta$$

Y como este ángulo se genera entre los dos puntos a ambos lados del eje "y", se puede decir que el ángulo de separación entre electrodos está dado por:

$$\beta = 2(90° - \theta) = 2\alpha \qquad (18)$$

DETERMINACIÓN DE LA SEPARACIÓN DE IMPACTO EN LA ESTRUCTURA.

El punto de impacto en la estructura es el punto de la estructura que tiene más probabilidades de ser impactado por un rayo al aplicar el método de la esfera rodante.

El caso de separación de impacto para este tipo de configuración se muestra en la **figura 13**.

En esta figura es posible observar cómo, además de los puntos A y B que son las puntas de los pararrayos, la esfera hace contacto con un tercer punto ubicado entre los dos pararrayos sobre la estructura que se desea proteger.

Esta separación de impacto "Lm" es la separación máxima a la que deben estar los pararrayos entre sí para que la estructura ya no está protegida. Cualquier magnitud de la separación entre pararrayos que sea inferior o más pequeña que la separación de impacto se podrá decir que hace que la estructura está protegida.

En otras palabras, si los pararrayos se ubican con una separación entre sí de "Lm" metros, la estructura no está protegida, pero si su separación es menor que Lm, la estructura estará protegida contra descargas atmosféricas.

Como la magnitud de un arco que se crea entre los dos pararrayos está dada por:

$$Lm = R * \beta$$

Pero el ángulo debe darse en radianes. Se debe presentar la ecuación convertida a radianes y en función de sus componentes rectangulares, de tal manera que se puede decir que la separación máxima entre electrodos está dada por:

$$\mathbf{Lm} = \frac{\pi R(90 - \theta)}{90} \qquad (16)$$

En donde:

R: es el radio de la esfera que contiene la superficie de la cúpula.

θ: es el ángulo calculado con las componentes rectangulares "X2 6 "Y" obtenidas de la configuración del problema.

CALCULO DE LA SEPARACIÓN DE DISEÑO:

Luego de determinar la separación máxima de impacto se debe calcular la separación de diseño; esta separación es la separación física segura entre los dos pararrayos (puntas captadoras) para que la estructura no sea impactada por una descarga atmosférica.

Al igual que en el caso anterior, para el cálculo de la separación de diseño "Ld" se introducirá un nuevo factor que será llamado factor de seguridad que se representara por "fs". El factor de seguridad "fs" es el porcentaje que se podrá incrementar la separación de diseño "Ld" antes de alcanzar la separación de impacto "Lm". Para determinar "Ld" se tiene que:

$$\mathbf{Ld\,(1 + fs) = Lm}$$

En donde 0 < fs < 1.

De la ecuación anterior es posible despejar la separación de diseño "Ld", y se obtienen que:

$$L_d = \frac{L_m}{(1 + fs)} \qquad (7)$$

DETERMINACIÓN DE LA ALTURA PROTEGIDA:

La altura protegida "h_p" es la separación que existe entre la estructura protegida y el punto más bajo de la esfera rodante cuando hace contacto en dos puntas captadoras consecutivas.

En la **figura 14** se designa esta altura como "h_p".

Para calcular la altura protegida "h_p" se toma como referencia lo mostrado en la **figura 14**. De esta figura podemos deducir que al reducir la separación máxima hasta obtener la separación de diseño Ld el ángulo entre los pararrayos se reduce, separando la estructura de la esfera rodante.

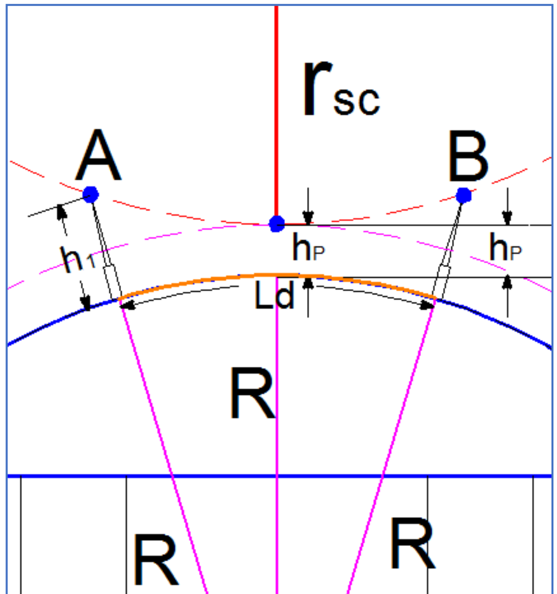


Figura 14. Altura protegida y separación protegida en superficies.

Es por esta razón que la base de cálculo de la altura protegida debe ser la separación segura y con esta separación se deben obtener los nuevos puntos de contacto entre la esfera rodante y las puntas captadoras.

Esto se hará sustituyendo la separación máxima por la separación de diseño en la ecuación (16), de tal manera que esta ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$\boxed{\mathbf{Ld} = \frac{\pi R(90 - \theta_s)}{90} \qquad (17)}$$

Y de esta ecuación podremos despejar el ángulo θs que se crea entre las dos puntas captadoras al estar separadas entre sí por una distancia "Ld".

De tal manera que el ángulo θ está dado por:

$$\theta_s = 90 - \frac{90\ Ld}{\pi R} \qquad (18)$$

Y con este nuevo ángulo se pueden calcular las coordenadas "X" & "Y" de la nueva ubicación de los pararrayos (puntas captadoras).

Estas coordenadas se obtienen de la siguiente manera:

$$Y = (R + h_1)\ \mathrm{Sen}\ \theta_s$$

$$X = (R + h_1)\ \mathrm{Cos}\ \theta_s$$

En donde:

R: es el radio de la esfera que contiene la superficie de la cúpula.

h_1: es la altura (el largo) del pararrayos que se desea utilizar.

Finalmente, estas coordenadas pueden ser reemplazadas en la ecuación (12) y despejar de esta ecuación h_2 que para este caso sería la altura protegida h_p.

$$x^2 + (Y - [R+h_2+rsc])^2 = r_{sc}^2 \qquad (12)$$

Si se despeja de la ecuación (12) hp (que es la misma hp), se tiene que la altura protegida está dada por:

$$h_p = Y - R - rsc + \sqrt{rsc^2 - X^2} \qquad (19)$$

PROTOCOLOS DE DISEÑO Y CÁLCULO

Para la elaboración de un diseño y de un cálculo de un apantallamiento deben emplearse los siguientes protocolos:

PROTOCOLO CASO 1:

- Determinar el nivel de riesgo de la edificación.
- Con el nivel de riesgo se escoge el radio de le esfera de protección "r_{sc}".
- Se obtiene la altura de la edificación desde el suelo.
- Se selecciona el tamaño del pararrayos (punta captadora) que se utilizara en el apantallamiento.
- Se calcula la separación a la que habrá más probabilidad de impacto con la ecuación (6).

$$Lm = \sqrt{2\,[h1+h2]\ r_{sc} - [h1+h2]^2} \qquad (6)$$

- Determinación se la separación de diseño.

$$L_d = \frac{L_m}{(1 + fs)} \qquad (7)$$

- Determinación de la Separación y la Altura protegida

$$\mathbf{Ls = Lm - Ld}$$

PROTOCOLO CASO 2:

- Determinar el centro de la esfera que contiene la superficie de la cubierta de la estructura.
- Determinar el nivel de riesgo de la edificación.
- Con el nivel de riesgo se escoge el radio de le esfera de protección "r_{sc}".
- Se selecciona el tamaño del pararrayos (punta captadora) que se utilizara en el apantallamiento.
- Se selecciona el factor de seguridad de se empleara en el cálculo.
- Se determina la separación de impacto L_m con la ecuación (16).

$$Lm = \frac{\pi R(90 - \theta)}{90} \quad (16)$$

- Se calcula la separación de diseño "Ld" con la ecuación (20).

$$L_d = \frac{L_m}{(1 + fs)} \quad (20)$$

- Se calculan las nuevas coordenadas "X" & "Y" de las puntas captadoras teniendo en cuenta la separación de diseño.
- Se calcula la altura protegida "h_p" con la ecuación (19).

$$h_p = Y - R - rsc + \sqrt{rsc^2 - X^2} \quad (19)$$

REFERENCIAS

CASA Ospina Fabio. Tierra Soporte de la seguridad Eléctrica. Seg. Edición Bogotá. D. C Junio del 2003.

NTC 4552. (Norma técnica Colombiana) especificaciones y métodos de diseño de protección contra descargas atmosféricas.

NTC 2050. (Norma técnica Colombiana) código eléctrico Colombiano.

IEC 62305-1, Ed. 1: Protection against lightning – Part 1: General principles

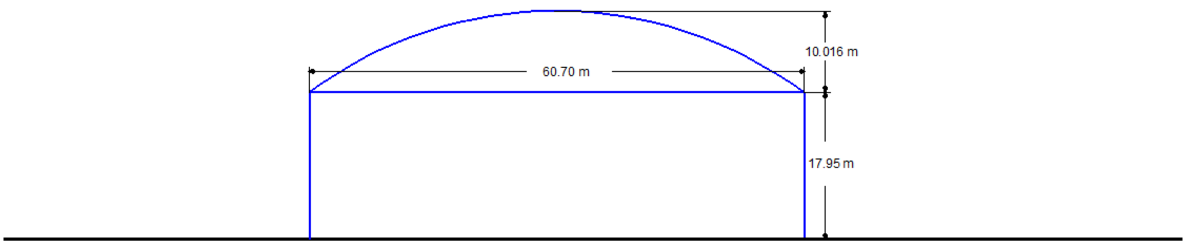
IEC 62305-2, Ed. 1: Protection against lightning - Part 2: Risk management

ANEXO 1

EJEMPLO DE APLICACIÓN

EJEMPLO DE CÁLCULO DE APANTALLAMIENTO UTILIZANDO EL MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE

Determine la separación de impacto, la separación de diseño y las alturas protegidas de las diferentes zonas de la edificación que se muestra en la siguiente figura.

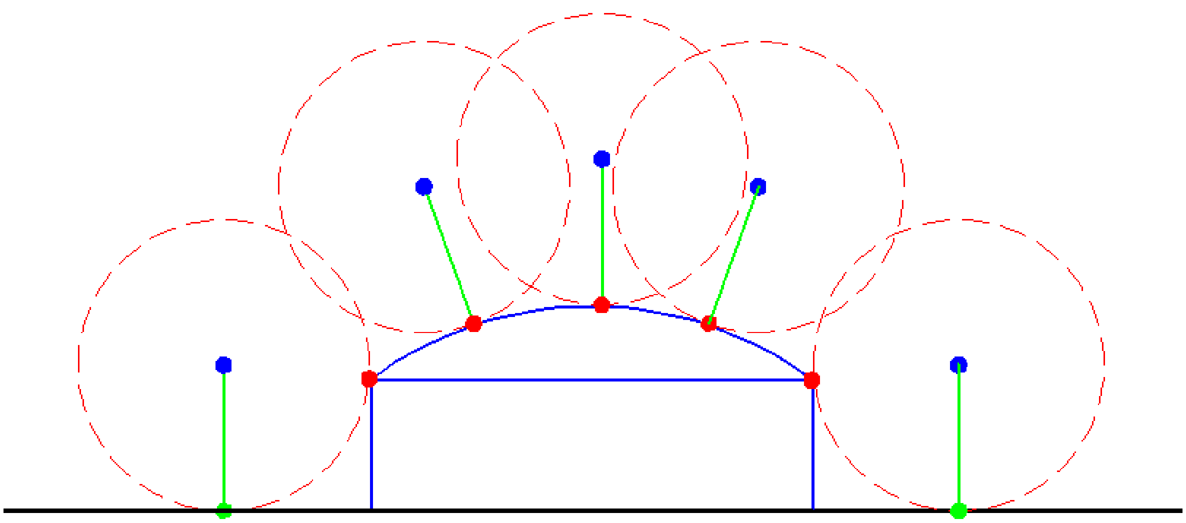


Luego de realizar los cálculos se determinó que la edificación tiene un nivel de riesgo tal que se plantea el análisis para una esfera rodante de 20 metros de radio y se utilizaran pararrayos (puntas captadoras) de dos punto un metros (2.10 m) de altura incluida la base de soporte.

DESARROLLO DEL PROBLEMA:

Se conocen las dimensiones de la edificación, se conoce la altura del pararrayos que es 2.10 m y se ha calculado que la esfera rodante tendrá un radio de 20 metros.

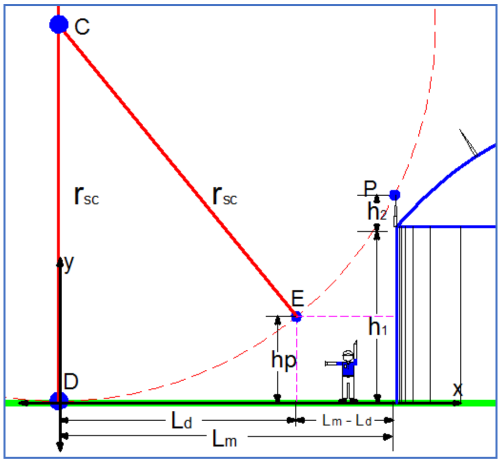
La esfera rodante se trasladaría sobre la estructura de la siguiente manera:



En la figura anterior los puntos azules muestran los centros de las esferas, los puntos verdes muestran los puntos de contacto de la esfera con el suelo y los puntos rojos son los puntos en los que la esfera hará contacto con la estructura; es de anotar que la esfera rueda sobre la estructura lo que da infinitos puntos de contacto en ella, los mostrados solo son los más significativos.

CONCEPTOS PARA EL CASO 1:

El caso 1 es el que se presenta cuando la esfera rodante hace contacto en el suelo y una punta de captación ubicada en un extremo de la edificación.



En donde:

Lm: es la separación de impacto, es decir, la distancia máxima de separación entre la edificación y el punto del suelo que tiene más probabilidad de recibir un impacto de un rayo.

Ld: es la separación de diseño que es la distancia entre el punto de impacto y el área segura.

Ls: es la distancia protegida que es el ancho de la zona segura junto a la edificación.

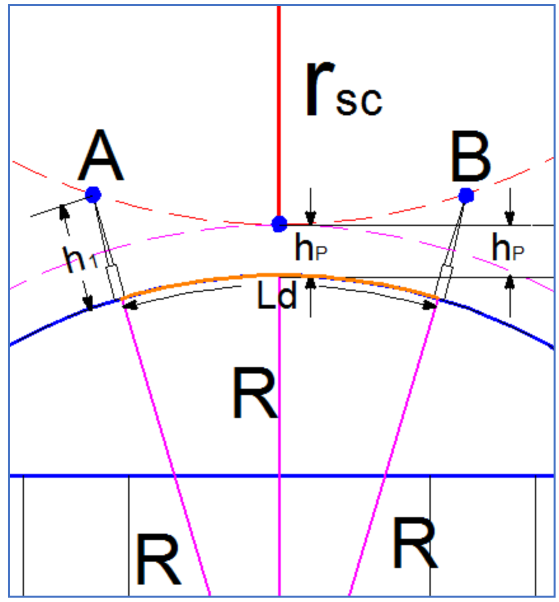
hp: es la altura protegida que es la altura de la zona segura junto a la edificación.

h1: es la altura de la edificación sobre la que está instalado el pararrayos (o la punta captadora)

h2: es la altura del pararrayos o el tamaño del pararrayos.

CONCEPTOS PARA EL CASO 2:

El caso 2 es el que se presenta cuando la esfera rodante hace contacto en la parte superior de dos puntas de captación ubicada a la misma altura sobre la edificación.



En donde:

Lm: es la separación de impacto, es decir, la distancia máxima de separación entre los pararrayos que permiten que un rayo haga impacto en un punto de la edificación.

Ld: es la separación de diseño que es la separación entre los pararrayos que al ubicarlos a dicha distancia entre si crean una zona segura entre la esfera rodante y la edificación.

hp: es la altura protegida que es la altura de la zona segura justo entre el punto más bajo de la esfera rodante y la edificación.

h1: es la altura del pararrayos o el tamaño del pararrayos.

CALCULO DE LA SECCIÓN LATERAL:

$h_1 = 17.95$ m

$h_2 = 0.00$ m planteando un pararrayos perpendicular a la estructura lateral.

$r_{sc} = 20.00$ m

Factor de Seguridad, fs = 25% = (0,25)

Separación de impacto:

$$Lm = \sqrt{2\,[h1+h2]\ r_{sc} - [h1+h2]^2}$$

$$Lm = \sqrt{2\,[17.95+0]\ 20 - [17.95+0]^2}$$

$$Lm = \sqrt{718 - 322.2025}$$

$$Lm = 19.8946 \text{ m.}$$

Separación de diseño:

$$L_d = \frac{L_m}{(1 + fs)}$$

Ld = 19.8946 / (1 + 0.25)

Ld = 19.8946 / 1.25

Ld = 15.9157 m

Separación Protegida:

Ls = Lm – Ld

Ls = 19.8946 m – 15.9157m

Ls = 3.9789 m

Altura Protegida:

$$h_p = -\sqrt{r_{sc}^{\ 2} - Ld^{\ 2}} + r_{sc}$$

$$h_p = -\sqrt{20^2 - (15.92)^2} + 20$$

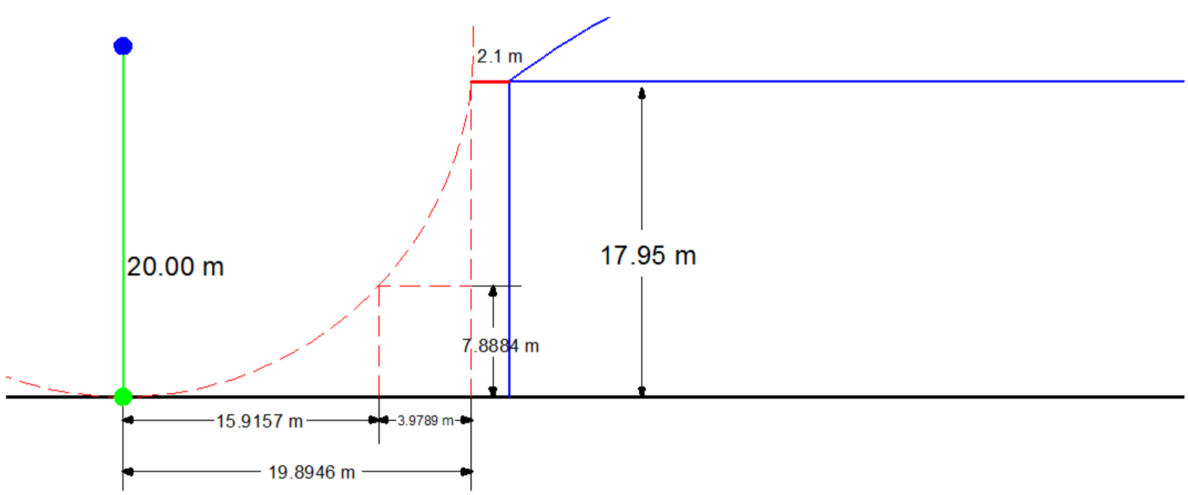
$$h_p = -\sqrt{400 - 253.31} + 20$$

$$h_p = -\sqrt{146.69} + 20$$

$$h_p = -12.1116 + 20$$

$$h_p = 7.8884 \text{ m}$$

Todos estos resultados se muestran en la siguiente figura.



Ing. Jairo Mora Martínez
jairomor@gmail.com

CALCULO DE LA SECCIÓN LATERAL:

$h_1 = 17.95$ m

$h_2 = 2.1$ m planteando un pararrayos vertical paralelo a la estructura lateral.

$r_{sc} = 20.00$ m

Factor de Seguridad, fs = 25% = (0,25)

Separación de impacto:

$$Lm = \sqrt{2\,[h1+h2]\ r_{sc} - [h1+h2]^2}$$

$$Lm = \sqrt{2\,[17.95+2.1]\ 20 - [17.95+2.1]^2}$$

$$Lm = \sqrt{802 - 402}$$

$$Lm = 19.9999 \text{ m.}$$

Separación de diseño:

$$L_d = \frac{L_m}{(1 + fs)}$$

Ld = 19.9999 / (1 + 0.25)

Ld = 19.9999 / 1.25

Ld = 15.9999 m

Separación Protegida:

Ls = Lm – Ld

Ls = 19.9999 m – 15.9999m

Ls = 3.9999 m

Altura Protegida:

$$h_p = -\sqrt{r_{sc}^{\,2} - Ld^{\,2}} + r_{sc}$$

$$h_p = -\sqrt{20^2 - (15.99)^2} + 20$$

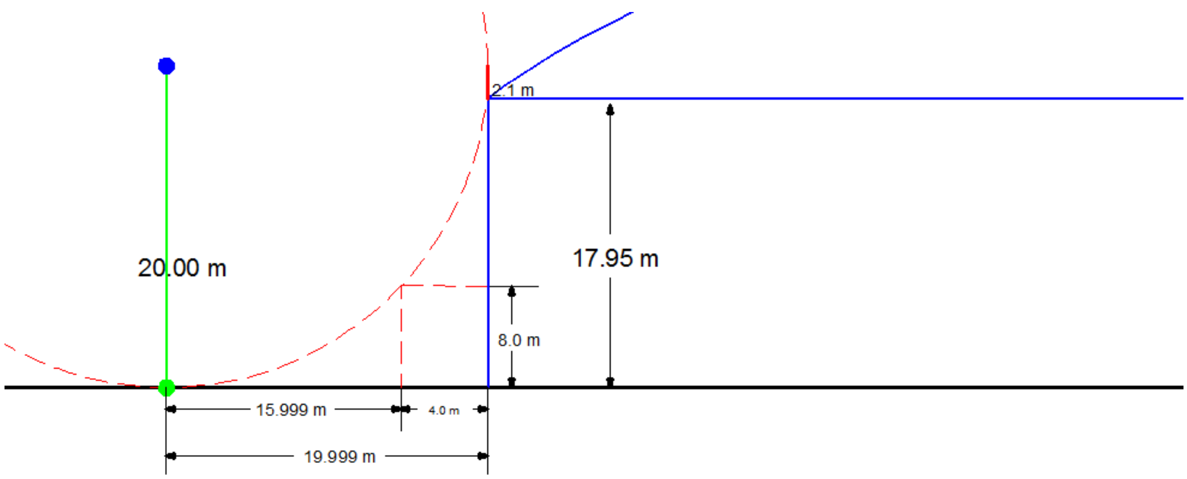
$$h_p = -\sqrt{400 - 255.9968} + 20$$

$$h_p = -\sqrt{144} + 20$$

$$h_p = -12 + 20$$

$$h_p = 8.0 \text{ m}$$

Todos estos resultados se muestran en la siguiente figura.



CALCULO DE LA SECCIÓN SUPERIOR O CÚPULA:

Mediante el método de las dos rectas se determinó el centro y el radio R de la cúpula.

R = 50.9905 m

h_1 = 2.1 m

r_{sc} = 20.00 m

Factor de Seguridad, fs = 25% = (0,25)

SEPARACIÓN DE IMPACTO

Determinación de las coordenadas de la punta captadora:

$$\mathbf{Y} = \frac{(R+h_1)^2 + (R+rsc)^2 - rsc^2}{2(R+rsc)}$$

$$Y = \frac{(50.9905+2.1)^2 + (50.9905+20)^2 - 20^2}{2(50.9905+20)}$$

$$Y = \frac{2818.6012 + 5039.6511 - 400}{141.981}$$

$$Y = 52.53 \text{ m}$$

$$\mathbf{X} = \sqrt{(R+h_1)^2 - Y^2} \quad \mathbf{(17)}$$

$$X = \sqrt{(50.9905 + 2.1)^2 - 52.53^2}$$

$$X = \sqrt{2818.6011 - 2759.4009}$$

$$X = \sqrt{59.2002} = 7.6942$$

Determinación del Angulo máximo de apertura:

$$\theta = \tan^{-1} (Y / X)$$

$$\theta = \tan^{-1} (52.5299 / 7.6942)$$

$$\theta = 81.6669$$

$$\beta = 2(90° - 81.6669) = 16.667$$

Determinación de la separación de impacto:

$$\mathbf{Lm} = \frac{\pi R(90 - \theta)}{90}$$

$$\mathbf{Lm} = \frac{50.9905 * \pi * (8.3331)}{90}$$

Lm = 14.8321 m

Esto significa que si los electrodos se ubican a una distancia de 14.8321 m uno del otro, la estructura ya estará desprotegida. A una separación menor entre electrodos estará protegida.

Separación de diseño:

$$L_d = \frac{L_m}{(1 + fs)}$$

Ld = 14.8321 / (1 + 0.25)

Ld = 14.8321 / 1.25

Ld = 11.8657 m

DETERMINACIÓN DE LA ALTURA PROTEGIDA:

Determinación del Angulo seguro:

$$\boxed{\theta_s = 90 - \frac{90\, Ld}{\pi R}}$$

$$\boxed{\theta_s = 90 - \frac{90 * 11.8657}{\pi * 50.9905}}$$

$$\theta_s = 83.3335$$

Y = (50.9905 + 2.1) Sen 83.3335

X = (50.9905 + 2.1) Cos 83.3335

Y = 52.7315 m

X = 6.1633 m

El angulo de separación entre electrodos esta dado por:

$$\beta = 2(90° - 83.3335) = 13.333°$$

Si el Angulo de instalación es menor que 13.333° más protegida estará la estructura pues los electrodos están más cercanos entre sí.

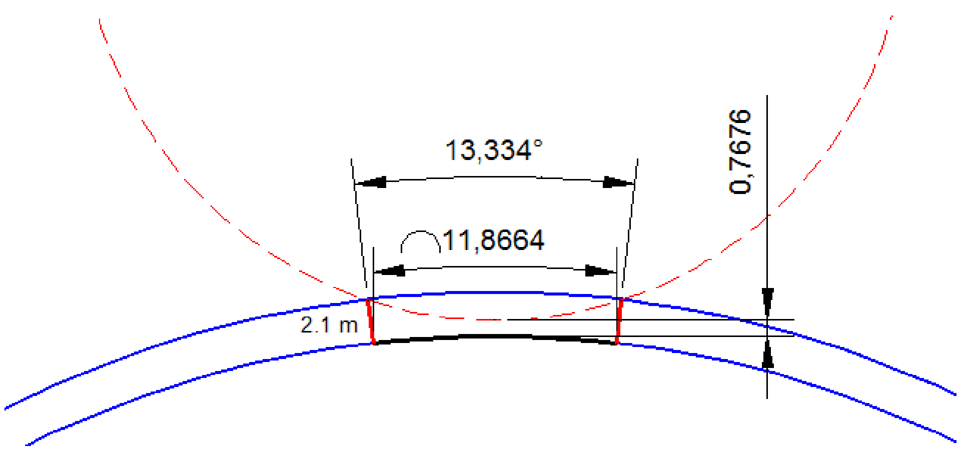
La altura protegida está dada por:

$$h_p = Y - R - rsc + \sqrt{rsc^2 - X^2}$$

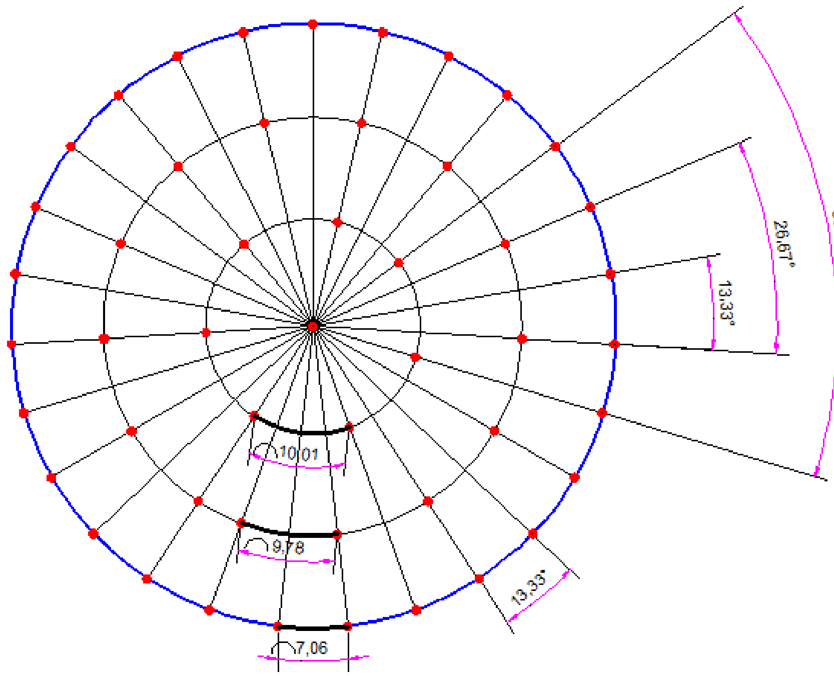
$$h_p = -18.259 + \sqrt{362.0137}$$

$$h_p = -18.259 + 19.0267$$

$$h_p = 0.7677 \text{ m}$$



CONFIGURACIÓN GENERAL DEL SISTEMA



Se plantea una separación entre electrodos de 7.06 m en la parte exterior de la cúpula compuesta de 27 pararrayos. Una separación entre electrodos de 9.78 m en el nivel intermedio compuesto por 14 electrodos en el nivel 2 y finalmente, 7 electrodos en el nivel 3 separados 10.01 m entre si y un electrodo en el centro de la estructura, es decir, en la parte más alta de la cúpula.