

**ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL DISEÑO DEL  
APANTALLAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE USO FINAL, UTILIZANDO EL  
MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE**

**WILSON YOVANY CÁRDENAS PARADA  
CRISTHIAN IVAN GALVIS CANO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2016**

**ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL DISEÑO DEL  
APANTALLAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE USO FINAL, UTILIZANDO EL  
MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE**

**WILSON YOVANY CÁRDENAS PARADA  
CRISTHIAN IVAN GALVIS CANO**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electricista**

**DIRECTOR  
JULIO CÉSAR CHACÓN VELASCO  
Magister en potencia eléctrica**

**CODIRECTOR  
Ing., Dr., HERMANN RAÚL VARGAS TORRES  
Doctor en ingeniería eléctrica**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2016**

## DEDICATORIA

A Dios y la virgen María primeramente por darme las fuerzas para alcanzar una nueva meta en mi vida gloria y alabanza para ellos.

A mis padres Fideligno y Graciela por ser los principales promotores de este sueño, gracias a ellos por confiar y creer en mí los quiero mucho.

A mi esposa Mariluz Medina F. por su amor, paciencia y sacrificio este logro también es tuyo te amo mucho.

A mis hijos Isabella y Diego Alejandro gracias porque con su sonrisa alegran mi vida, por ser mi motivación a seguir alcanzando metas, por descubrir el verdadero amor, esto es para ustedes mis amores los amo con todas mis fuerzas.

A mis hermanos Miller, Angela y Yolima por enseñarme que existe un amor puro y desinteresado esto también es de ustedes.

A mis sobrinos Lina, Juan José, Samuel y Salomé a quien los adoro y llenan mi vida de alegrías.

A mis compañeros con los cuales compartí momentos inolvidables gracias y en el camino nos encontramos.

*Wilson Cárdenas Parada*

## DEDICATORIA

Doy las gracias a la santísima Virgen María por acogirme en su amparo maternal. "santa madre de Dios ayúdame a alcanzar mis metas personales como me ayudaste en ésta, y nunca me dejes a merced del mundo".

De todo corazón, dedico este logro personal a mis padres, Ivan y Alicia, por todo el sacrificio y compromiso de amor que tuvieron y tendrán conmigo a lo largo de mi vida.

Gracias a mis hermanos, Jonathan y Erika, por motivarme y apoyarme a lo largo de este caminar.

A mi tía Cecília, que como segunda madre, ha estado pendiente día a día de mis acciones, siempre presta a colaborarme con voz de aliento y amor.

Yo sé que este triunfo no es sólo mío, sino también de todos mis familiares, que de una u otra manera, me apoyaron de todo corazón.

A veces el camino es pesado, el terreno pedregoso, pero gracias a mis compañeros y amigos, que con su apoyo y alegría hicieron de alguna manera este recorrido más agradable y ameno.

Gracias a la universidad industrial de Santander por brindarme este título, y gracias por el servicio de bienestar universitario por brindarme la oportunidad de crecer en sabiduría y experiencia para así alcanzar este logro.

*Cristhian Juan Galvis*

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	16
1. MARCO TEÓRICO .....	18
1.1 DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS.....	18
1.2 SISTEMA DE CAPTACIÓN .....	18
2. MÉTODO DE INTERCEPTACIÓN O CAPTACIÓN AÉREO.....	19
2.1 EL MÉTODO ELECTROGEOMÉTRICO (MEG) .....	19
2.1.1 Método de la Esfera Rodante (MER).....	20
2.1.2 Método del ángulo de protección (MAP).....	23
2.1.3 Método del Enmallado (ME).....	25
3. IMPLEMENTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE EN MATLAB.....	27
3.1 SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNA APLICADO A LA ESTRUCTURA (SPE) .....	28
3.2 DISEÑO DE UN SOFTWARE DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS .....	31
3.2.1 Esferas que tocan tangentemente al plano del polígono .....	32
3.2.2 Esferas que tocan tangentemente a cada una de las líneas infinitas que delimitan al polígono. ....	34
3.2.3 Esferas que tocan tangentemente a cada uno de los vértices del polígono. ....	36
3.2.4 Algoritmo dentro del prisma y dentro de la píldora.....	37
3.2.5 Análisis de graficas entre polígonos. ....	41
4. EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE A UNA ESTRUCTURA .....	44
4.1 DIAGRAMA DE FLUJO.....	49

5. APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA PARA ALGUNOS CASOS PRÁCTICOS EN EDIFICACIONES DE USO FINAL .....	50
5.1 VERIFICACIÓN DEL PROGRAMA EN EL EDIFICIO DE LA E3T .....	50
5.2 APLICACIÓN DEL PROGRAMA A LA BASÍLICA MENOR NUESTRA SEÑORA DEL SOCORRO SANTANDER .....	55
6. CONCLUSIONES .....	58
7. RECOMENDACIONES .....	59
REFERENCIAS .....	60
BIBLIOGRAFÍA .....	62
ANEXOS .....	65

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Método de la Esfera Rodante .....	21
Figura 2. Utilización del método de la esfera rodante .....	22
Figura 3. Ángulo de protección dependiendo de la altura relativa y el nivel de protección .....	23
Figura 4. Ejemplo de protección mediante el método del ángulo con un nivel de protección II .....	24
Figura 5. Estructura protegida por el método del ángulo .....	25
Figura 6. Ejemplo del método enmallado.....	26
Figura 7. Ilustración del método de la esfera rodante aplicado a una estructura ...	27
Figura 8. Vista de la protección externa contra rayos a una estructura .....	29
Figura 9. Disposición de las puntas captadoras en una estructura.....	30
Figura 10. Componentes de un sistema de protección externa (SPE) .....	30
Figura 11. Esferas tangentes a un polígono en 3D.....	33
Figura 12. Esferas tangentes a un polígono en el plano x-y .....	33
Figura 13. Puntos tangentes dentro de un polígono .....	34
Figura 14. Esferas tangentes a una línea que delimitan un polígono .....	35
Figura 15. puntos dentro de un segmento de línea.....	36
Figura 16. Esferas que tocan tangente al vértice del polígono .....	37
Figura 17. Resultado de los puntos al segmento de línea y a un vértice .....	38
Figura 18. Volumen extruido del polígono .....	39
Figura 19. polígono envuelto en una píldora.....	40
Figura 20. Centros de esferas tangentes al plano, a cada uno de los segmentos y a los vértices de un polígono .....	41
Figura 21. Ejemplo de un polígono adyacente.....	42
Figura 22. Ejemplo estructura en L .....	44

Figura 23. Ejemplo construcción de la estructura .....	46
Figura 24. Posición de la primera punta captadora en la estructura .....	46
Figura 25. Distribución de 4 puntas captadoras en la estructura .....	47
Figura 26. Estructura en L con todas sus puntas captadoras .....	48
Figura 27. Vista frontal del edificio de la E3T.....	51
Figura 28. Vista frontal derecha de la E3T.....	51
Figura 29. Vista superior del edificio de la E3T aplicado al programa .....	52
Figura 30. disposición final de las puntas captadoras al edificio de la E3T para un nivel de protección I .....	53
Figura 31. Disposición final del edificio de la E3T con nivel de protección III .....	53
Figura 32. Disposición final del edificio de la E3T con nivel de protección IV .....	54
Figura 33. Basílica Menor Nuestra Señora del Socorro Santander .....	55
Figura 34. Disposición final de las puntas captadoras de la Basílica.....	56

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Valores máximos del radio de la esfera rodante según el nivel de protección .....	22
Tabla 2. Dimensiones de la malla para los niveles de protección.....	26
Tabla 3. Información básica de entrada del software.....	45

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A MANUAL DE USUARIO.....	65
ANEXO B. PROCEDIMIENTO MATEMÁTICO DE LOS ALGORITMOS .....	85

## RESUMEN

**TÍTULO:** ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL DISEÑO DEL APANTALLAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE USO FINAL, UTILIZANDO EL MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE \*.

**AUTORES:** WILSON YOVANY CÁRDENAS PARADA, CRISTHIAN IVAN GALVIS CANO\*\*.

**PALABRAS CLAVES:** Apantallamiento, Método de la esfera rodante, Protección contra rayos.

### DESCRIPCIÓN:

En el diseño de los sistemas de protección contra rayos la eficiencia con que se apantalla cualquier estructura de uso final puede ser evaluada mediante cualquier método electrogeométrico dependiendo del tipo de edificación, con el fin de proteger la estructura contra daños físicos y salvaguardar la vida de las personas.

El objetivo principal de este trabajo fue la elaboración de una herramienta software para el diseño del apantallamiento de estructuras de uso final con alturas menor a 55 metros, utilizando el método de la esfera rodante, descrito bajo los lineamientos de la norma técnica colombiana NTC 4552.

En este trabajo se desarrolló un software de apantallamiento en el que se analizan estructuras tridimensionales (3D) con base en el método de la esfera rodante y se elaboró en el programa Matlab. El software arroja como resultado una imagen 3D (hecha por el usuario) de la estructura protegida en la cual se puede evidenciar los puntos vulnerables de la edificación con probabilidad de impacto de rayo y a su vez se visualiza el recorrido de los centros de las esferas por toda la estructura.

Lo que significa, con el desarrollo de este software se tiene la solución a sistemas de protección externa contra rayos por medio de la aplicación de un modelo electrogeométrico en 3D, utilizando la correcta distribución de las puntas captadoras para diferentes estructuras, con el fin de garantizar la protección total de toda la edificación.

y finalmente se desarrolló una guía básica para la utilización del software de apantallamiento a estructuras de uso final.

---

\* Tesis de grado en la modalidad de investigación.

\*\* Facultad de ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones. Director: MPE., Julio César Chacón Velasco, Codirector: Dr., Hermann Raúl Vargas Torres.

## ABSTRACT

**TITLE:** DEVELOPING A SOFTWARE TOOL FOR DESIGNING STRUCTURES SCREENING OF END USE, USING THE ROLLING SPHERE METHOD\*.

**AUTHORS:** WILSON YOVANY CÁRDENAS PARADA, CRISTHIAN IVAN GALVIS CANO\*\*.

**KEYWORDS:** Shielding, Rolling sphere method, lightning protection.

### DESCRIPTION:

In designing systems lightning protection efficiency with any structure of end use is screened can be assessed by any electrogeometric method depending on the type of building, in order to protect the structure against physical damage and safeguard the lives of people.

The main objective of this work was the development of a software tool for the design of shielding structures end-use less than 55 meters in height, using the method of the rolling sphere, described under the guidelines of the Colombian technical standard NTC 4552.

This paper presents a software screening in which (3D) three-dimensional structures are analyzed on the basis of the rolling sphere method and was developed in the Matlab program was developed. The software indicates the result of a 3D image (made by the user) of the protected structure which can be evidenced vulnerable parts of the building with probability of lightning strike and turn the course of the centers of the spheres is displayed by whole structure.

Which means, with the development of this software has the solution to systems external lightning protection by applying a electrogeometric 3D model, using the correct distribution termination rods for different structures, in order to ensure the full protection of the entire building.

and finally a basic guide for the use of screening software to end-use structures was developed.

---

\* Final undergraduate Project developed in research modality.

\*\* Physics mechanical engineering faculty. Electrical, electronic and telecommunications school. Director: MPE., Julio César Chacón Velasco, Codirector: Hermann Raúl Vargas Torres.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico que hace partícipe a la academia como elemento indispensable para dar solución a los problemas que aquejan a la sociedad, permite mejorar las condiciones de seguridad ante las adversidades del medio ambiente.

Sin duda alguna un sistema de protección externa contra rayos en edificaciones tiene como función esencial interceptar las descargas que se dirigen hacia la estructura, incluyendo aquellas que podrían impactar en sus costados y conducir la corriente del rayo hasta el suelo o terreno. Este sistema debe dispersar esa corriente sin causar daños, originadas por peligrosas chispas que puedan iniciar un fuego o una explosión.

La probabilidad de que una estructura sea penetrada por una corriente de rayo decrece considerablemente por la presencia de un sistema de protección externa diseñado adecuadamente. Para diferentes estructuras es importante hacer un análisis de protección utilizando el método electro-geométrico para así desarrollar un sistema de protección externo óptimo y eficaz.

Es por esto que en el presente documento se presenta el desarrollo de una herramienta software para el diseño del apantallamiento de estructuras de uso final, utilizando como método de captación la esfera rodante. En vista a que presenta un análisis sencillo y confiable para el cálculo de la ubicación y la altura de los componentes de un sistema de captación aérea, el método de la esfera rodante es sin duda un método adecuado para estructuras con altura menor a 55 m.

Para analizar el sistema de protección contra rayos por medio del método de la esfera rodante y observar sus diferentes implementaciones, es necesario trabajar en una herramienta software que permita calcular las correctas posiciones de las puntas captadoras a partir de los diferentes parámetros y dimensionamientos de las estructuras, de una forma sencilla y rápida, que permita tomar decisiones de la forma correcta para proteger dichas edificaciones.

## **1. MARCO TEÓRICO**

### **1.1 DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS**

Las nubes de tormenta al tener cargas eléctricas, pueden hacer una igualación violenta de cargas de signo opuesto, ya sea dentro de la nube, entre nubes, entre nube y la ionosfera, entre nube y aire, entre nube y tierra o entre tierra y nube, en su mayoría a través de gases de baja conductividad, transformando a su vez energía eléctrica en energía lumínica (relámpagos) y audible (trueno).

### **1.2 SISTEMA DE CAPTACIÓN**

El sistema de captación tiene como propósito, recibir las descargas eléctricas atmosféricas que probablemente puedan impactar directamente a la estructura y luego enviar la corriente del rayo por las bajantes de la estructura hasta llevarla de forma segura al subsuelo. El sistema de captación puede estar constituido por diferentes combinaciones de los siguientes dispositivos: [1].

- Varillas tipo Franklin.
- Cables colgantes.
- Malla de conductores.

Es necesario resaltar que los elementos de interceptación de descargas atmosféricas deben ser varillas de cobre solidas o tubulares en forma de bayonetas, con una altura por encima de las partes altas de la estructura, no menor a 25 cm [2].

## **2. MÉTODO DE INTERCEPTACIÓN O CAPTACIÓN AÉREO**

Los métodos desarrollados para el diseño de un SIPRA (sistema de protección externa) tienen su aplicación mediante las investigaciones del apantallamiento en estructuras que proveen las varillas verticales, los conductores horizontales conectados a tierra, y las líneas de transmisión de energía eléctrica.

Para el análisis de su localización y su respectiva altura con base a la edificación a proteger, los elementos de un sistema de captación aérea, deben estar posicionadas según sus especificaciones y al que más se adapte, con uno o más de los siguientes métodos [3].

- Método de la Esfera Rodante-MER
- Método del Ángulo de protección-MAP
- Método del Enmallado-ME

Estos 3 métodos se basan en el Método Electrogeométrico (MEG), ya que son los más utilizados en el análisis de protección externa contra descargas eléctricas atmosféricas. Dada la facilidad en los cálculos, los hace sencillos en su aplicación y útiles.

### **2.1 EL MÉTODO ELECTROGEOMÉTRICO (MEG)**

Las observaciones en protección contra rayos para el siglo XX se centraron en estimar el ángulo de protección para líneas de transmisión de energía eléctrica y conocer así áreas de protección delimitadas por líneas rectas.

El MEG fue diseñado para determinar la ubicación correcta de los cables de guarda de líneas de transmisión. El concepto fundamental del método electrogeométrico es el radio de impacto, el cual se define como el radio entre la punta del líder descendente del rayo y la estructura en tierra (en su mayoría definido por la punta captadora), en el momento que se inicia un líder ascendente o de conexión [3]. El MEG es de gran uso hoy en día en la protección contra rayos debido a su fácil comprensión y aplicación.

Por un largo tiempo los investigadores de diferentes organizaciones trabajaron en pruebas de laboratorio y campo para desarrollar la ecuación que mejor se ajuste al método electrogeométrico en función de la magnitud de la corriente ( $I$ ) y el radio de impacto ( $r_{sc}$ ). En Colombia según la NTC para los valores de corriente mínima en zona tropical, dicha expresión es la siguiente [4]:

$$S = 3,9 * I_p^{0,78} [m]$$

Donde:

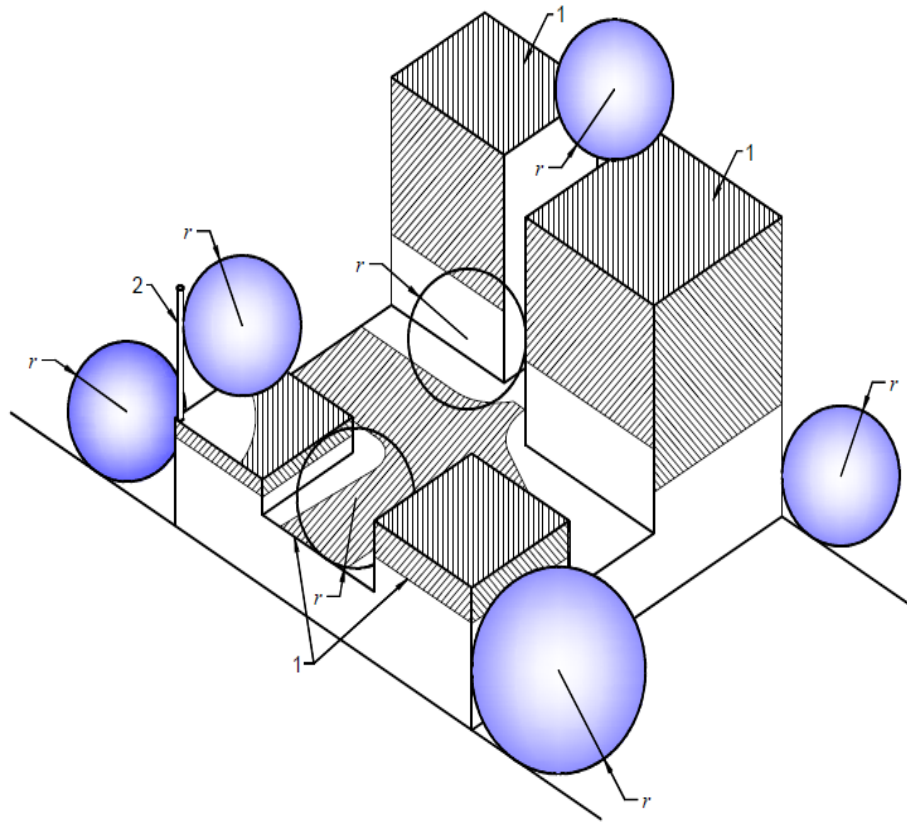
$S$  = Distancia de impacto para terreno plano sin estructuras.

$I_p$  = Corriente pico mínima en zona tropical

**2.1.1 Método de la Esfera Rodante (MER).** El método de la esfera rodante tiene como propósito mostrar el área de protección de la estructura, y poder deducir la ubicación de las puntas captadoras. Este método consiste en hacer rodar una esfera imaginaria de radio  $r_s$  desde la tierra por todas las caras de la estructura a proteger y cualquier otro objeto que haga parte de la edificación.

Toda área de la edificación que esté protegida, la esfera solo tocará los elementos de protección (puntas captadoras). Al rodar la esfera desde el nivel de la tierra hacia la edificación a apantallar se instalará una terminal aérea en el punto de contacto con la estructura como se ilustra en la figura 1.

**Figura 1. Método de la Esfera Rodante**



Fuente: Norma Técnica colombiana NTC 4552-3

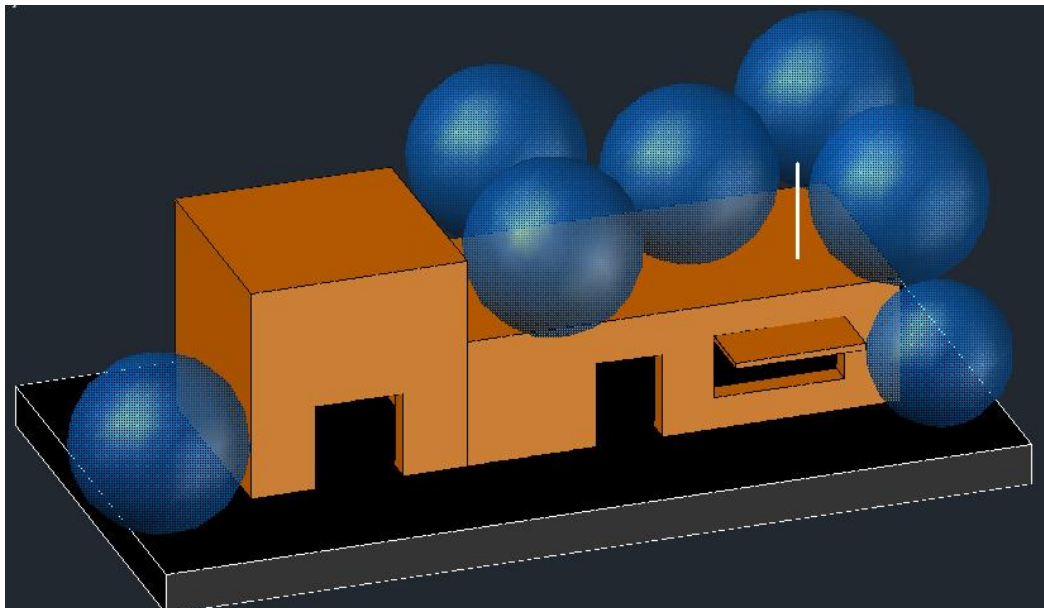
Se ubica una primera terminal en el primer contacto, cuya altura debe ser suficiente para que la esfera no toque la estructura cuando ésta se apoye sobre tierra y sobre la punta de la terminal aérea.

La punta según la norma técnica colombiana debe ser mínimo de 25 centímetros [2]. Después de tener el primer punto de descarga para la corriente de rayo, debe rodarse la esfera por encima de la punta captadora y sobre la cara superior de la estructura, e inmediatamente instalarse una terminal aérea de intercepción en todos aquellos puntos donde la esfera imaginaria toque la edificación o elementos a proteger, de este modo la esfera siempre estará soportada por algún elemento del sistema de captación.

Según la reglamentación colombiana, expuesta en la norma técnica Colombia NTC 4552-3, las puntas de captación ubicadas en una edificación se deben localizar en las esquinas, puntos expuestos sobresalientes de la estructura y en los bordes [2].

La figura 2 muestra un ejemplo del método de la esfera rodante a lo largo de una estructura en 3D.

**Figura 2. Utilización del método de la esfera rodante**



**Tabla 1. Valores máximos del radio de la esfera rodante según el nivel de protección**

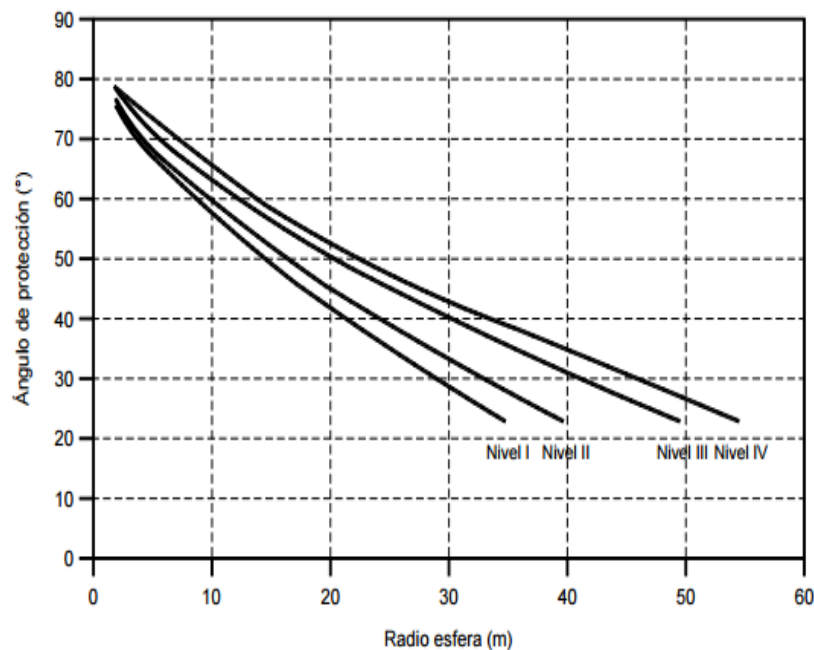
NIVEL DE PROTECCIÓN	RADIO DE LA ESFERA (m)
I	35
II	40
III	50
IV	55

Fuente: Norma Técnica Colombiana “NTC 4552 Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (rayos). parte 3: Daños físicos a estructuras y amenazas a la vida”

Cada punto lateral de la estructura tocado por la esfera es un punto factible de ser impactado, sin embargo, es necesario tener en cuenta que la probabilidad de que los rayos impacten los costados es prácticamente despreciable para estructuras menores a 60 m [2].

**2.1.2 Método del ángulo de protección (MAP).** El método del ángulo de protección en resumen es una forma más simple del método de la esfera rodante, en donde para una altura de la estructura con un determinado radio, existe un ángulo de protección de la punta captadora o cable aéreo de protección el cual puede determinarse mediante la figura 3, este método debe aplicarse a los edificios con dimensiones simétricas (ej. Cubierta inclinada) o para objetos que hagan parte de la estructura como es el caso de antenas, y tuberías de ventilación [5].

**Figura 3. Ángulo de protección dependiendo de la altura relativa y el nivel de protección**



Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 4552-3

El ángulo de protección que se genera en la punta captadora es un cono proyectado sobre el plano de referencia haciendo un barrido de ángulo  $\alpha$  a la vertical en todas sus dimensiones hasta envolver completamente la estructura

como se indica en la figura 4. Para cada nivel de protección existen diferentes ángulos de protección dependiendo de la altura de la punta.

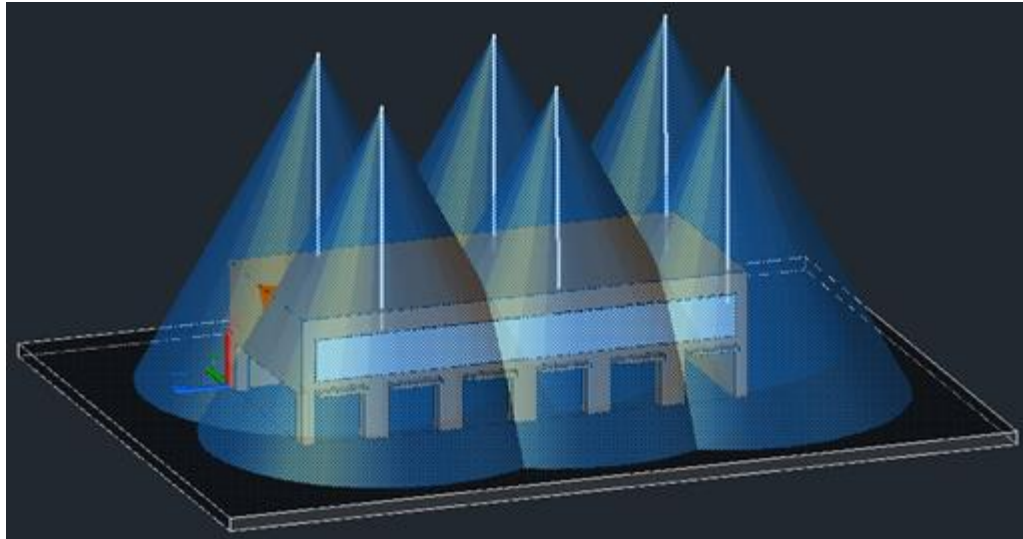
**Figura 4. Ejemplo de protección mediante el método del ángulo con un nivel de protección II**



Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 4552-3

Los conductores captadores, las puntas captadoras, los mástiles y los cables deben estar dispuestos de tal manera que todas las partes o piezas de la edificación que se pretende proteger se encuentren dentro del volumen de protección de la instalación captadora [5], generando para el caso de las puntas un volumen imaginario en forma de cono como se indica en la figura 5.

**Figura 5. Estructura protegida por el método del ángulo**

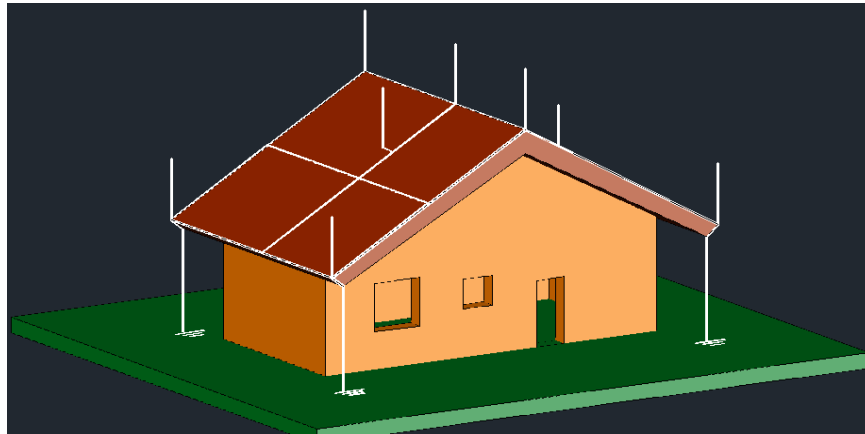


**2.1.3 Método del Enmallado (ME).** Este método es usado cuando es necesario proteger superficies de techo inclinado, planas de larga extensión, y que no tengan salientes de la estructura ver figura 6, en donde una malla conductora puede ser considerada para captar la protección contra impactos directos de toda la estructura.

Para este caso las terminaciones conductoras aéreas son colocadas sobre [2]:

- Los bordes del techo
- Terrazas
- Voladizos

**Figura 6. Ejemplo del método enmallado**



Este sistema de captación enmallado debe ser diseñado de tal manera que la corriente de rayo siempre encuentre al menos 2 vías de evacuación, las dimensiones del enmallado dependen del nivel de protección y de acuerdo con la norma NTC 4552-3 están dados en la siguiente tabla 2 [3].

**Tabla 2. Dimensiones de la malla para los niveles de protección**

<b>Nivel de Protección</b>	<b>Malla [m]</b>
Nivel I	5x5
Nivel II	10x10
Nivel III	15x15
Nivel IV	20x20

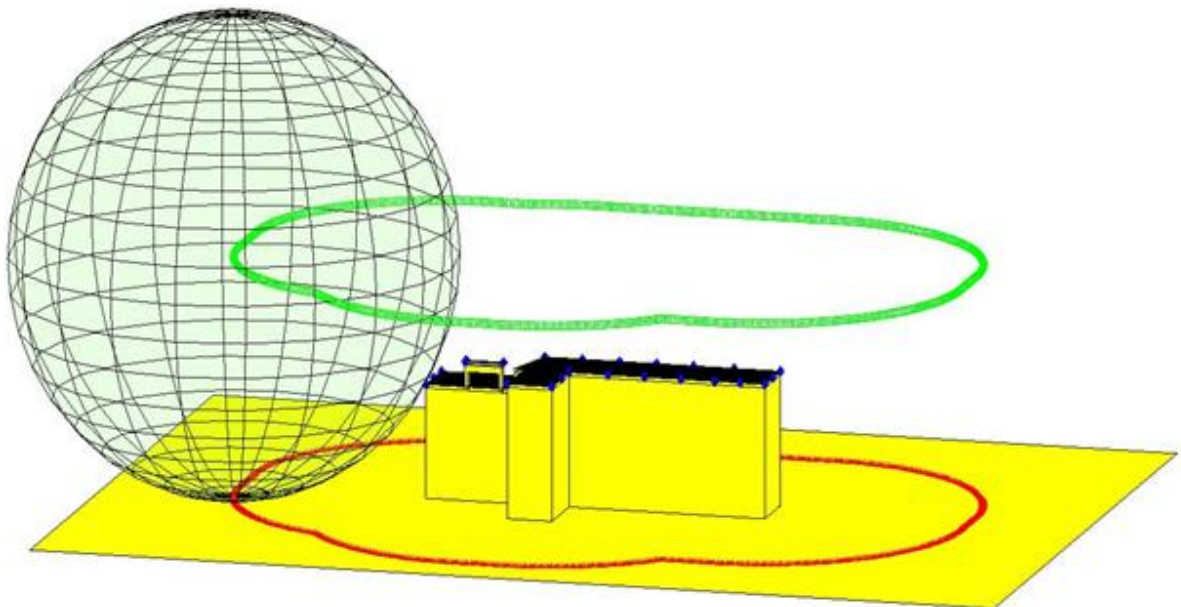
Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 4552-3

### 3. IMPLEMENTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE EN MATLAB

En la siguiente sección se resume la metodología realizada para la elaboración de la herramienta software desarrollada en Matlab. Facilitando de esta manera la implementación de una parte del sistema de protección externo, aplicando el concepto del sistema de captación.

El software desarrollado permite al usuario conocer la ubicación de las puntas captadoras en una estructura de uso final, habilitando su optimización lo cual conduce al ahorro del espacio en el plano estructural de la construcción. Los resultados de esta herramienta son realizados bajo los lineamientos de la norma técnica colombiana NTC 4552.

**Figura 7. Ilustración del método de la esfera rodante aplicado a una estructura**



La herramienta computacional arroja como resultado una gráfica en la cual se observan los centros de las esferas tangentes a los polígonos que conforman la edificación, estos centros aparecen de color verde, como se muestra en la figura 7, de igual forma en la parte inferior se observa el recorrido de los puntos tangentes con el plano de tierra y la estructura, este contacto aparece de color rojo y las puntas captadoras aparecen como un diamante de color azul.

### **3.1 SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNA APLICADO A LA ESTRUCTURA (SPE)**

La parte analizada del SPE en este proyecto es el sistema de captación ya que este es el encargado de interceptar los rayos que van a impactar la estructura.

Con la herramienta computacional se ofrece al usuario la posibilidad de visualizar las puntas captadoras sobre cualquier estructura, con el fin de protegerlas de los rayos que la pueden impactar, contribuyendo así a una parte del sistema de protección externa.

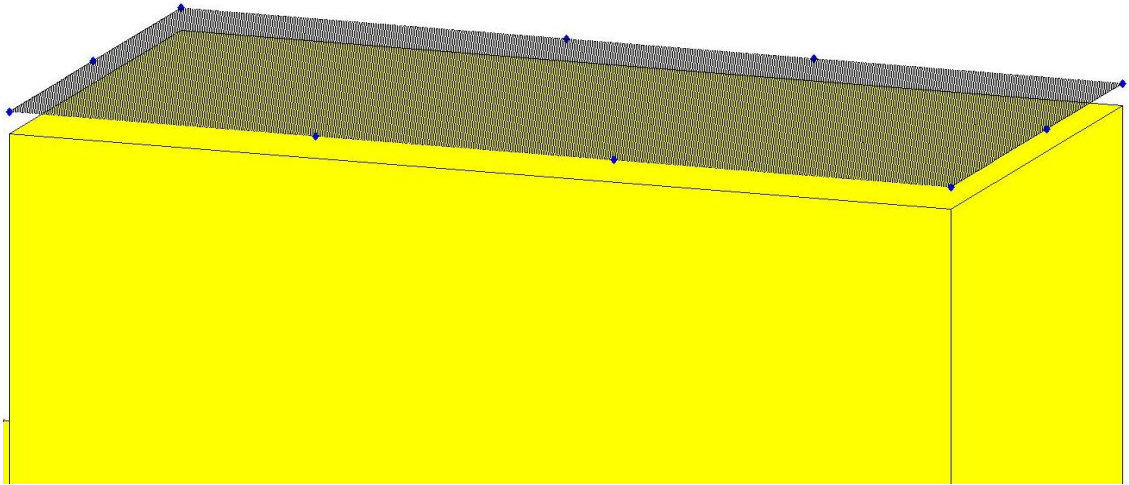
En la figura 8 se puede observar los tres sistemas que conforman el sistema de protección externa (sistema de captación, bajantes y sistema de puesta a tierra).

**Figura 8. Vista de la protección externa contra rayos a una estructura**



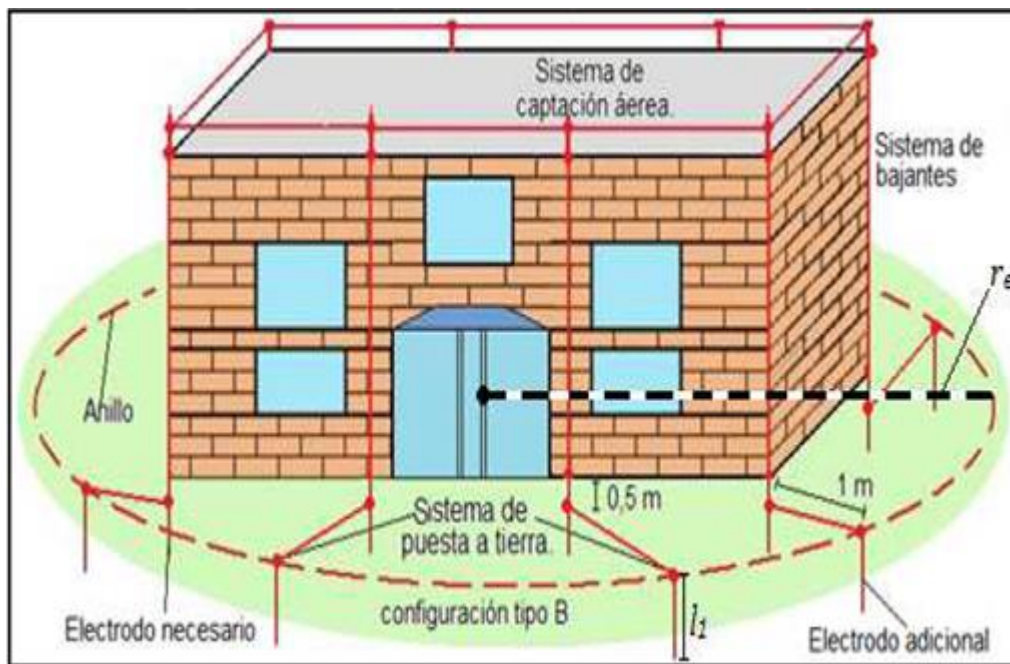
En la figura 9, se muestra cómo el software contribuye al sistema de protección externa aplicado a una estructura típica de un modelo residencial.

**Figura 9. Disposición de las puntas captadoras en una estructura**



Al ubicar las posiciones correctas de las puntas captadoras, en la figura 9 se observa la similitud con la figura 10, de cómo está conformado en su totalidad el sistema de protección externa de un edificio real.

**Figura 10. Componentes de un sistema de protección externa (SPE)**



Fuente: Protección contra rayos, Horacio Torres Sánchez

### 3.2 DISEÑO DE UN SOFTWARE DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

El programa RollingSphereMethod\_Estructura es una herramienta de simulación de sistemas de protección externa aplicados a estructuras de uso final, basados en el modelo electrogeométrico adaptado de la norma técnica colombiana NTC 4552 y desarrollado en el programa Matlab.

La ejecución del programa se hizo en diferentes etapas de diseño y desarrollo, finalmente se verifica su correcto funcionamiento en casos representados en estructuras tridimensionales.

La idea principal sobre la que trabaja la herramienta desarrollada consiste en determinar las esferas que tocan tangentemente a la estructura y que también tocan una punta captadora. Para resolver este problema, la estructura es definida a través de algunos polígonos que conforman las caras exteriores de la misma, así para determinar las esferas que tocan tangentemente a la estructura se hallan las esferas que tocan tangentemente a cada polígono y a su vez que tocan a la punta captadora. Sin embargo, entre las esferas que tocan tangentemente a uno de los polígonos y a la punta captadora, pueden existir algunas esferas que no tocan tangentemente a la estructura por lo tanto este es otro problema abordado en la herramienta desarrollada.

Para determinar las esferas que tocan tangentemente a un polígono y a la punta captadora se hallan tres soluciones principales que son:

- Esferas que tocan tangentemente al plano del polígono.
- Esferas que tocan tangentemente a cada una de las líneas infinitas que delimitan al polígono.
- Esferas que tocan tangentemente a cada una de los vértices del polígono.

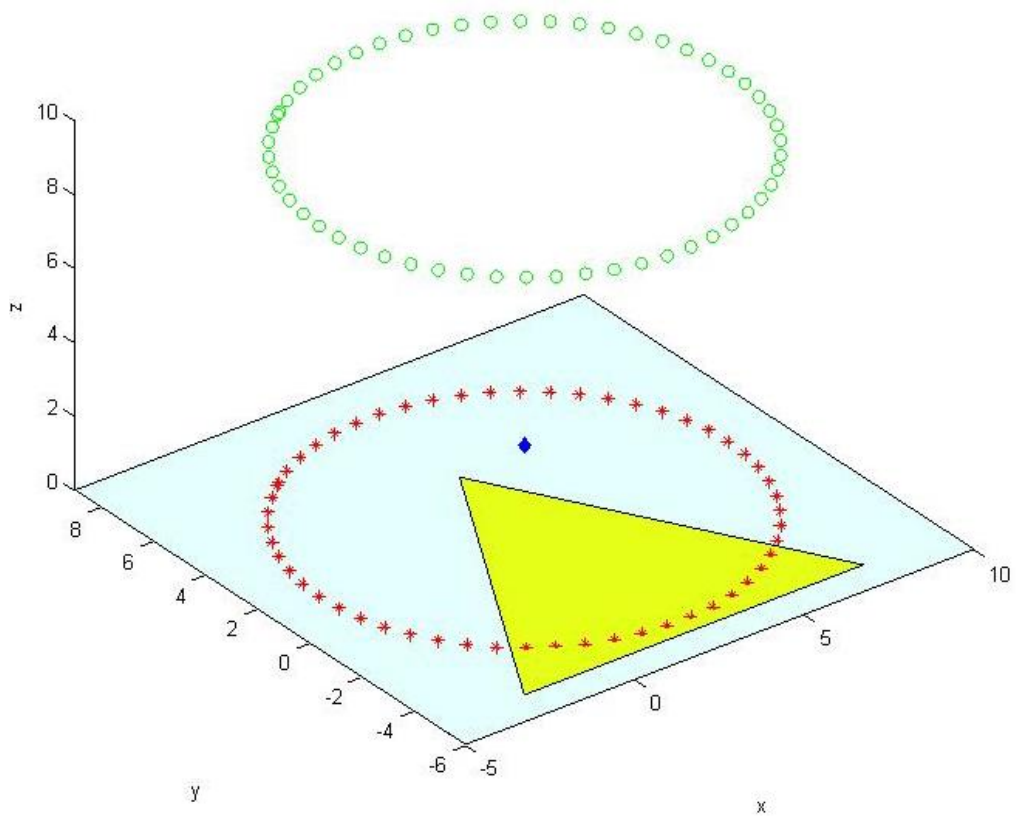
Sin embargo, no todas las esferas halladas en las tres soluciones principales tocan tangente al polígono por lo que hay que descartar algunas esferas en cada una de las soluciones principales. A continuación, se describe cada una de las tres soluciones principales y los cuatro algoritmos que se emplean para descartar aquellas esferas que no tocan tangente al polígono, estos tienen como nombre los siguientes:

- Dentro del polígono (Inside polygon)
- Dentro del segmento (Inside segment)
- Dentro de la píldora (Inside pill)
- Dentro del prisma (Inside prisma)

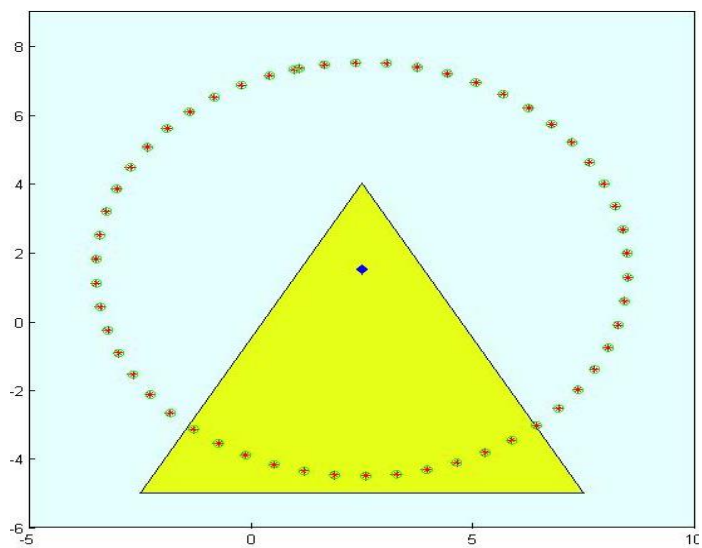
**3.2.1 Esferas que tocan tangente al plano del polígono.** En esta etapa se determinan las esferas que tocan tangente al plano del polígono y a la punta captadora, para esto se requiere como parámetros de entrada la ubicación de la punta captadora, el plano definido por un vector normal al plano y un punto perteneciente al plano, el radio de las esferas y la distancia entre los centros de las esferas. Estas esferas se hallan a partir de la determinación de sus centros y por cada esfera hallada se relaciona un punto en el plano en donde la esfera toca tangente al plano.

En la figura 11 se muestran las esferas que tocan tangente al plano del polígono con vértices  $[-2.5, -5, 0]$ ,  $[7.5, -5, 0]$  y  $[2.5, 4, 0]$ , triángulo en color amarillo, y a una punta captadora ubicada en las coordenadas  $[2.5, 1.5, 2]$ , diamante en azul. Los puntos en verde son los centros de las esferas y los puntos en rojo son los puntos del plano en donde las esferas tocan tangente al plano.

**Figura 11. Esferas tangentes a un polígono en 3D**



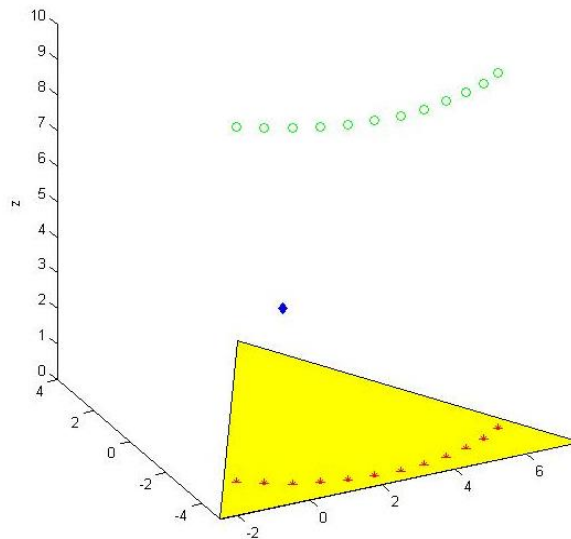
**Figura 12. Esferas tangentes a un polígono en el plano x-y**



Como se muestra en la figura 12 no todas las esferas que se hallan tocan tangentemente al polígono por lo tanto hay que descartar aquellas que no lo hacen y esto se logra a partir del algoritmo “dentro del polígono”.

**3.2.1.1 Algoritmo dentro del polígono:** Este algoritmo se basa en el algoritmo “Ray-Casting polygon” el cual determina si un punto dado está dentro del polígono. En la figura 13 se observa la aplicación “dentro del polígono” el cual deja sólo los puntos tangentes al polígono de color rojo y descarta de igual forma los que se encuentran por fuera del mismo.

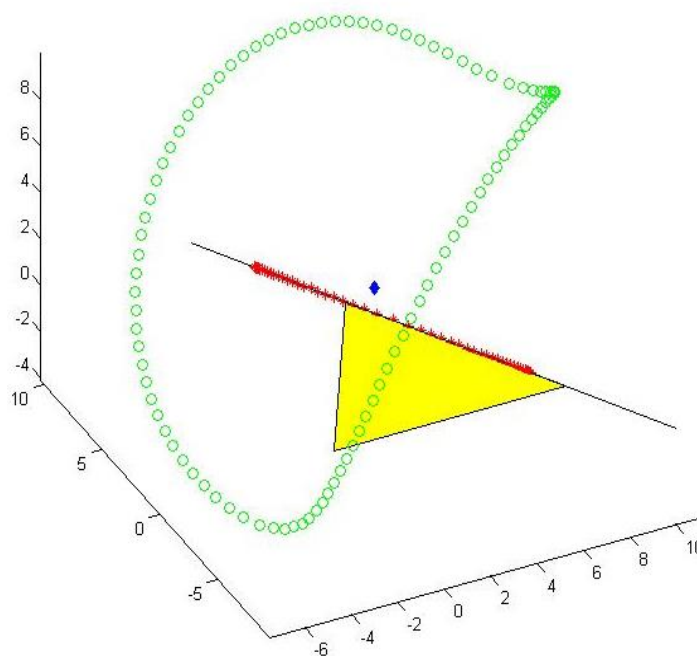
**Figura 13. Puntos tangentes dentro de un polígono**



**3.2.2 Esferas que tocan tangentemente a cada una de las líneas infinitas que delimitan al polígono.** En esta etapa se determina las esferas que tocan tangentemente a una de las líneas del polígono y una punta captadora, para esto se requiere como parámetros de entrada la ubicación de la punta captadora, la línea definida por un vector paralelo a la línea y un punto de la línea, el radio de la esfera y la distancia entre los centros de las esferas. Estas esferas se hallan a partir de la determinación de sus centros y por cada esfera se relaciona un punto

en la línea en donde la esfera la toca tangente. En la figura 14, se muestra la solución para una punta captadora ubicada en las coordenadas [2.5, 1.5, 2], diamante en azul, y una línea sobre uno de los lados del polígono definido en el ejemplo anterior, los puntos en verde son los centros de las esferas y los puntos en rojo son los puntos de la línea en donde las esferas tocan tangente a la línea.

**Figura 14. Esferas tangentes a una línea que delimitan un polígono**

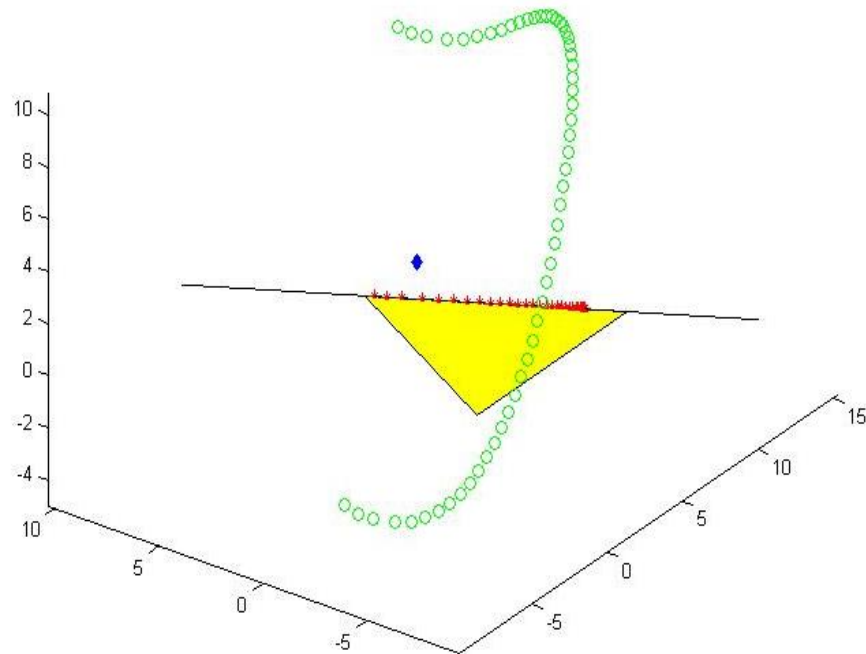


Las líneas al ser infinitas se deben determinar los puntos encontrados de la línea y definir cuáles son los que pertenecen dentro del segmento de línea y descartar los que no pertenecen a este segmento de línea, esto se logra con el algoritmo “dentro del segmento”.

**3.2.2.1 Algoritmo dentro del segmento:** Este algoritmo encuentra entre los puntos de la línea cuales están dentro del segmento de línea. En la figura 15 se puede observar la aplicación del algoritmo en el cual, en una línea infinita, éste

algoritmo sólo toma los puntos de un segmento de ésta que delimita el polígono puntos en rojo, y a su vez descarta los puntos que están por fuera del polígono.

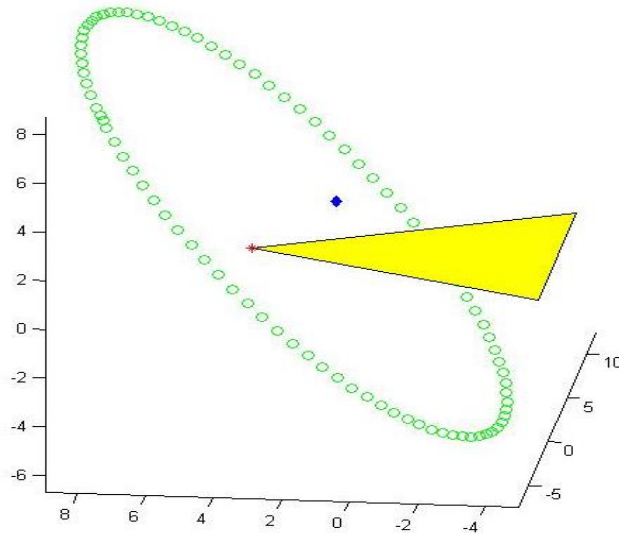
**Figura 15. puntos dentro de un segmento de línea**



**3.2.3 Esferas que tocan tangente a cada uno de los vértices del polígono.** En esta etapa se determinan las esferas que tocan tangente a uno de los vértices del polígono y a una punta captadora, para esto se requiere como parámetros de entrada la ubicación de la punta captadora, la ubicación del vértice del polígono, el radio de las esferas y la distancia entre los centros de las esferas. Estas esferas se hallan a partir de la determinación de sus centros y por cada esfera se determina un punto en el polígono en donde la esfera toca tangente al vértice del polígono. En la figura 16, se muestra la solución para una punta captadora ubicada en las coordenadas [2.5, 1.5, 2], diamante en azul, y uno de los vértices del polígono definido anteriormente. Los puntos en verde son los centros de las esferas y los puntos en rojo son los puntos en donde las esferas

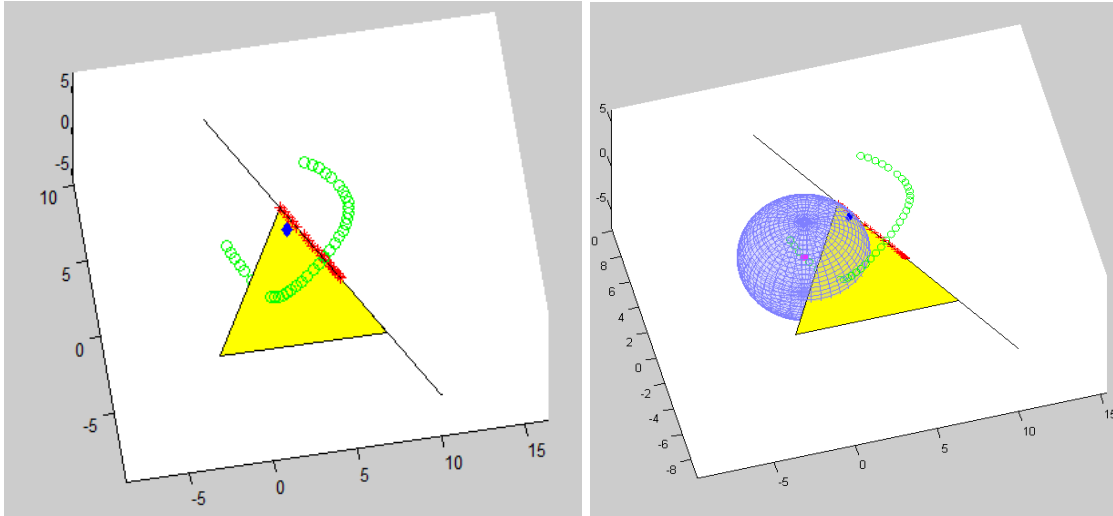
tocan tangente al vértice del polígono, nótese que estos puntos son el mismo vértice.

**Figura 16. Esferas que tocan tangente al vértice del polígono**



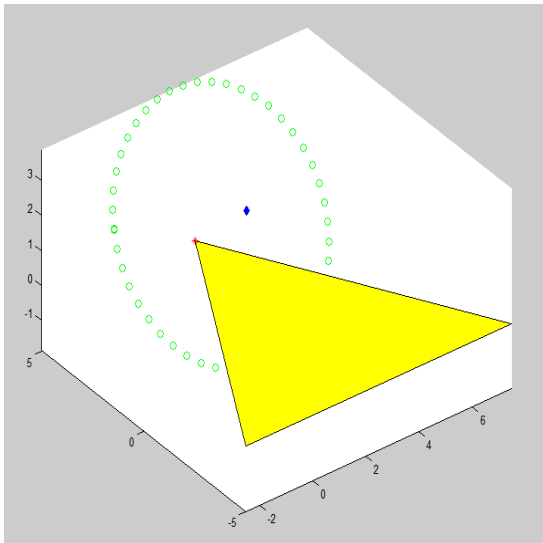
**3.2.4 Algoritmo dentro del prisma y dentro de la píldora.** Existen algunas esferas, halladas con las etapas anteriores, que tocan tangente a los segmentos de línea que delimitan a un polígono pero que a su vez no tocan tangente al mismo polígono, igualmente ocurre con las esferas que tocan tangente a los vértices del polígono. Esto se ilustra en la figura 17 para el caso del polígono con vértices  $[-2.5, -5, 0]$ ,  $[7.5, -5, 0]$  y  $[2.5, 4, 0]$  y una punta captadora ubicada en  $[2.5;1.5;2]$

**Figura 17. Resultado de los puntos al segmento de línea y a un vértice**

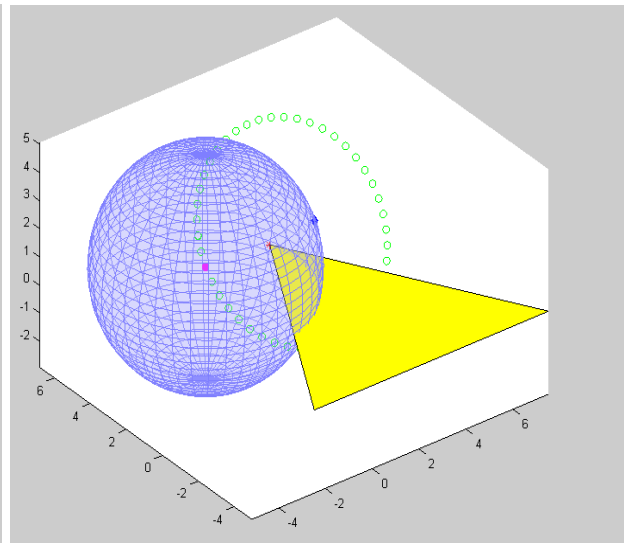


A. Puntos tangentes al segmento de línea

B. Esfera tangente al segmento pero no al polígono



C. Puntos tangentes al vértice del Polígono



D. Esfera tangente al vértice, pero no al polígono

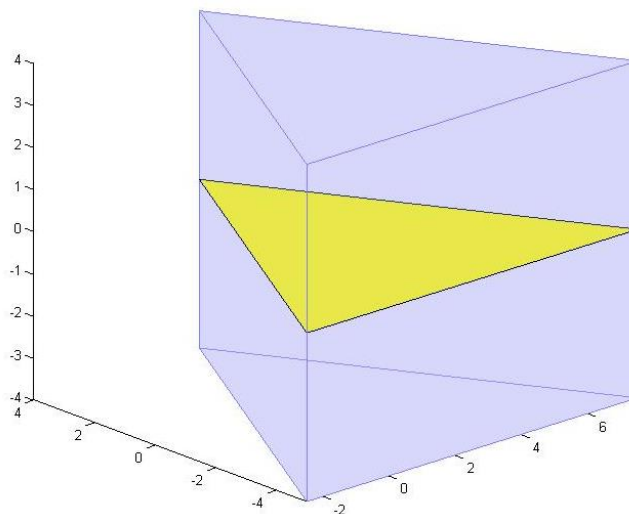
En la figura 17A se muestran todos los puntos que tocan tangentemente al segmento de línea del polígono que lo delimitan, la figura 17B nos indica que no todos los puntos tangentes al segmento son tangentes al polígono, por lo tanto

existen esferas que lo penetran, de igual forma sucede con los vértices del polígono, la figura 17C muestra todos los puntos tangentes al vértice, en la figura 17D es evidente resaltar que no todos los puntos tangentes al vértices son tangentes al polígono, por lo tanto, los algoritmos “dentro del prisma” y “dentro de la píldora” son aplicados para descartar todos estos puntos que no cumplen con los requisitos de contacto del polígono, resultando sólo aquellas esferas que sí tocan tangentemente al polígono.

Para esto se construyeron dos algoritmos llamados “dentro del prisma” y “dentro de la píldora”, para la solución de este problema los cuales se describen a continuación.

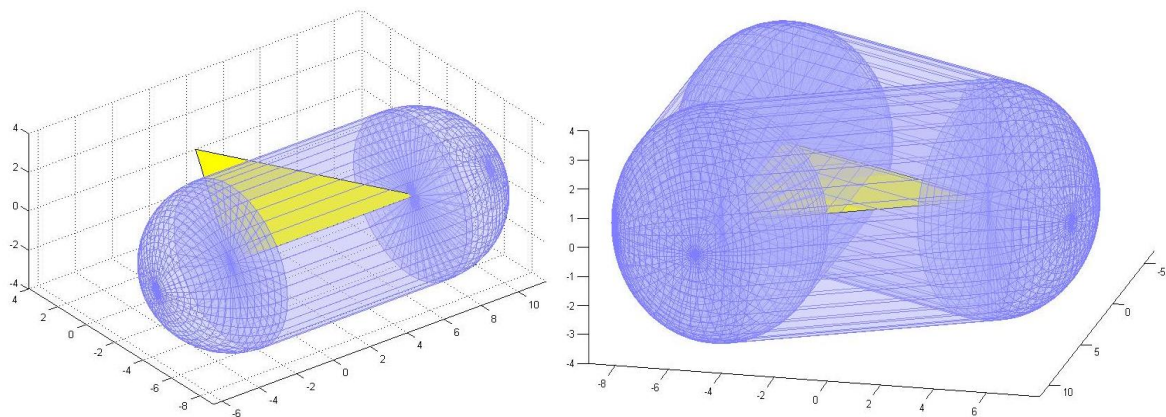
**3.2.4.1 Dentro del prisma:** El algoritmo “dentro del prisma” descarta aquellos centros de las esferas que se encuentran dentro de un volumen definido por la extrusión de un polígono hacia los dos lados del mismo con grosor igual al radio de las esferas en cada lado. En la figura 18 se muestra el volumen extruido del polígono del ejemplo anterior con un radio=4.

**Figura 18. Volumen extruido del polígono**



**3.2.4.2 Algoritmo dentro de la píldora:** El algoritmo “dentro de la píldora” descarta aquellos centros de las esferas que se encuentren dentro de un volumen construido a partir de uno de los segmentos de línea que delimitan a un polígono, este volumen resulta de la unión de un cilindro y dos esferas. El cilindro tiene como eje principal el segmento de línea que delimita al polígono, con grosor igual a dos veces el radio de las esferas halladas en las etapas anteriores. Las dos esferas que constituyen el volumen son esferas ubicadas en los extremos del segmento de línea con radio igual al radio de las esferas halladas en las etapas anteriores. Para el ejemplo anterior, ese volumen se ilustra en la figura 19a. En la figura 19b se muestran las 3 píldoras que se deben analizar para cada segmento de línea en el ejemplo anterior.

**Figura 19. polígono envuelto en una píldora**



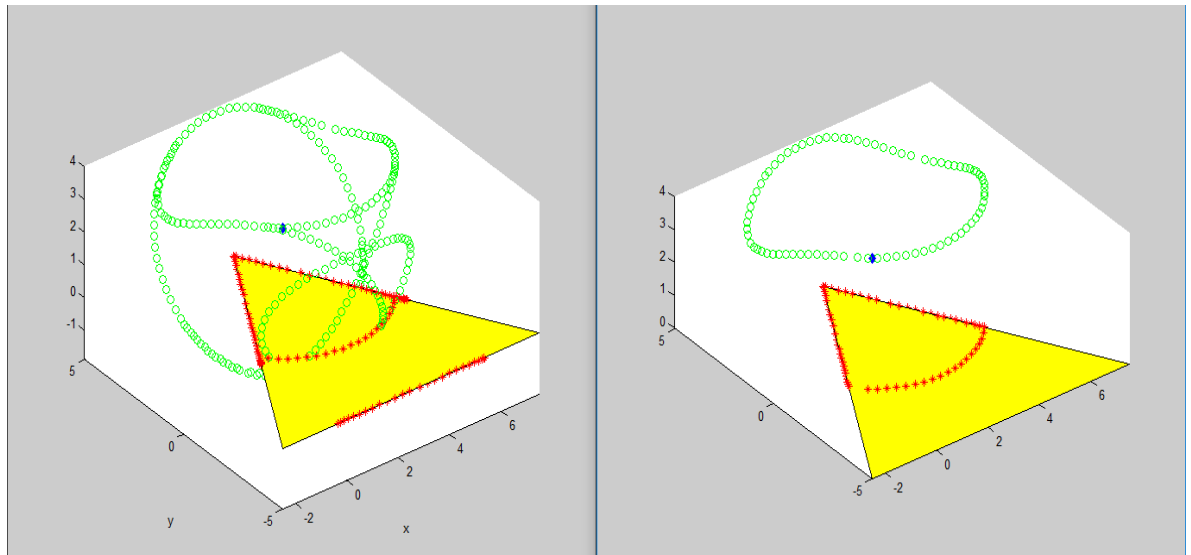
a. Píldora en un lado del polígono

b. Píldoras en los tres vértices del polígono

En la figura 20 se muestran todos los centros de las esferas que tocan tangente a la punta captadora del ejemplo anterior, a cada uno de los segmentos que delimitan este polígono y a cada uno de los vértices del mismo polígono. Según lo planteado anteriormente no todas las esferas pertenecientes a esos centros que se hallan en la figura 20A tocan tangente al polígono, por lo tanto, los algoritmos “dentro del prisma” y “dentro de la píldora” son aplicados,

dando como resultado los puntos tangentes al polígono, a la punta captadora, al vértice y al segmento de línea como se muestra en la figura 20B.

**Figura 20. Centros de esferas tangentes al plano, a cada uno de los segmentos y a los vértices de un polígono**



A. Centros de las Esferas tangentes

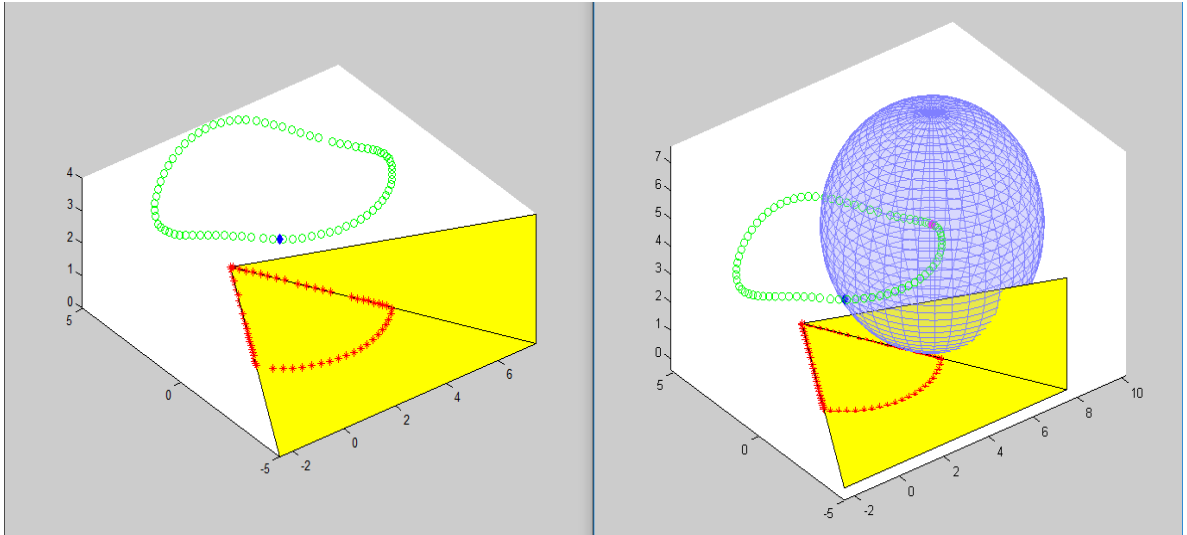
B. Centros de las esferas tangentes a un polígono, una línea y un vértice.

**3.2.5 Análisis de graficas entre polígonos.** Las soluciones que se hallaron anteriormente utilizando los algoritmos “dentro del prisma” y “dentro de la píldora” son para ese polígono, lo que significa que “dentro del prisma” y “dentro de la píldora” hay que aplicarlo a los demás polígonos adyacentes que conforman toda la estructura.

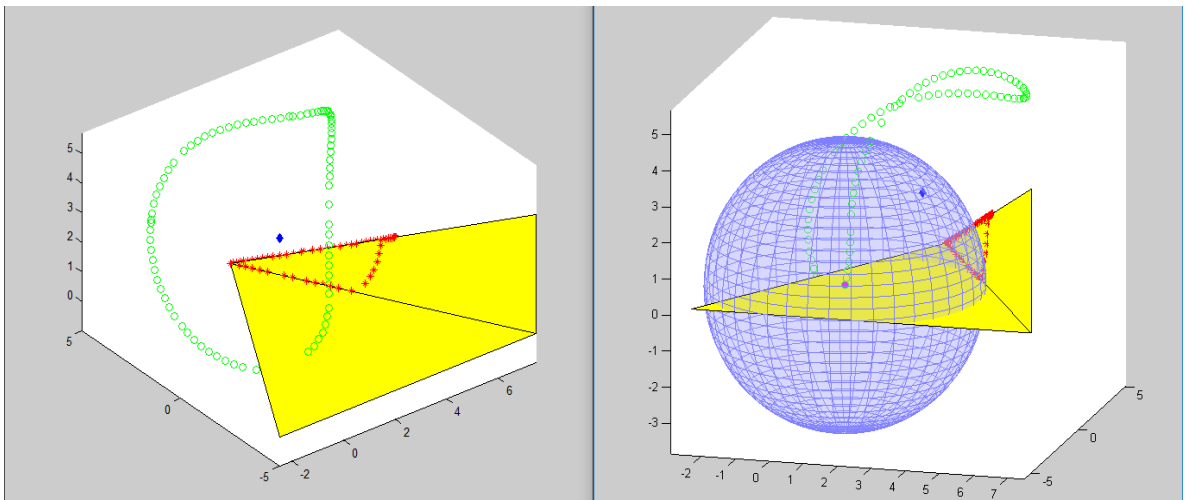
Si analizamos estas soluciones unidas entre los demás polígonos vemos que uno de los centros de las esferas penetra al otro polígono. en la figura 21a se muestra que uno de los centros de las esferas penetra al polígono adyacente y viceversa en la figura 21b, de esta manera hay que descartar las soluciones que tocan tangente a ese polígono, pero no tocan tangente a los demás dando

como solución final que todos sus centros de las esferas estén continuos como se muestra en la figura 21c.

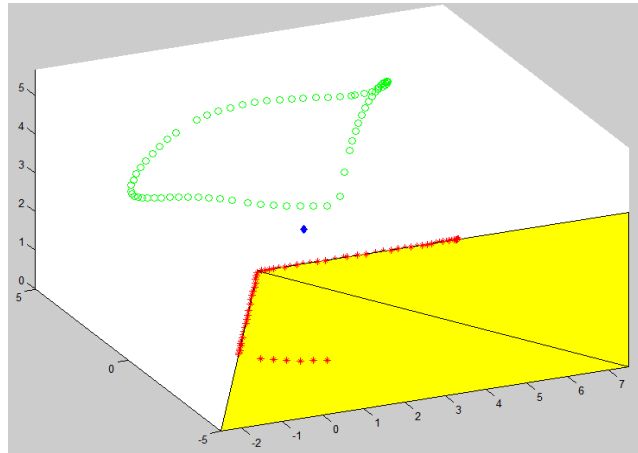
**Figura 21. Ejemplo de un polígono adyacente**



a. Centros de las esferas tangentes a una punta captadora de un polígono horizontal y centros de las esferas que penetran al polígono vertical.



b. Centros de las esferas tangentes a una punta captadora de un polígono vertical y centros de las esferas que penetran al polígono horizontal.

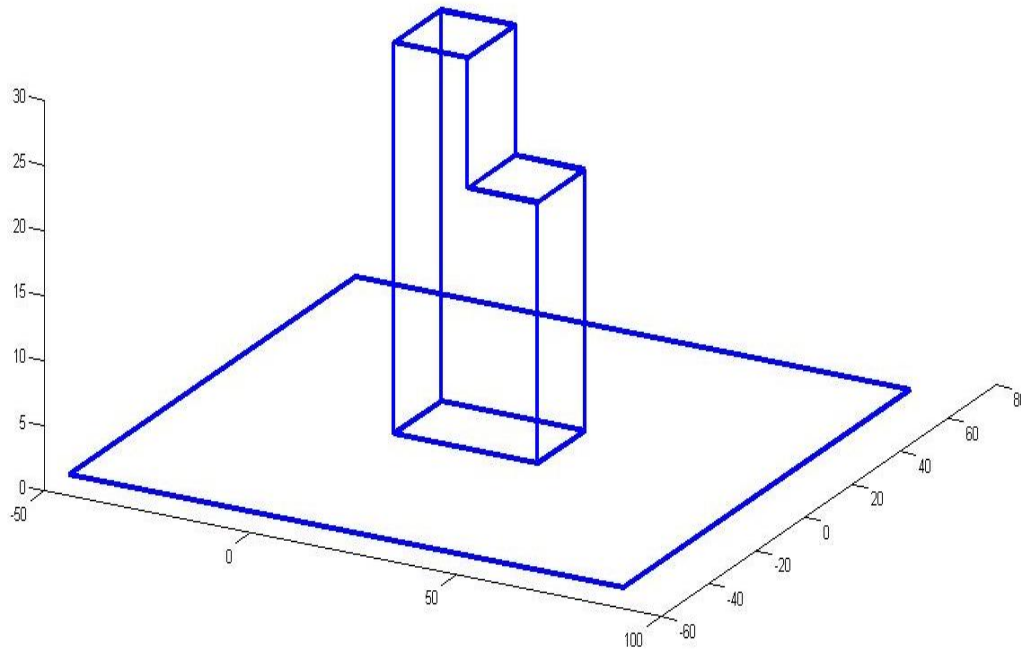


c. Resultado final de los puntos tangentes a una punta captadora y a los dos polígonos

#### 4. EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE A UNA ESTRUCTURA

Para este ejemplo se muestra una estructura en forma de L como en la figura 22 en el cual se deben validar los algoritmos anteriormente explicados y calcular el sistema de apantallamiento del mismo.

**Figura 22. Ejemplo estructura en L**



La información básica de entrada que se necesita para adelantar el proceso de verificación de la estructura se resume en la tabla 3.

**Tabla 3. Información básica de entrada del software**

Nivel de protección a toda la estructura	l
Altura de la punta captadora	PcapsHeight=0.5
Distancia entre las puntas captadoras	h1=0.1
Distancia media entre los centros de las esferas	h2=0.5
Radio de la esfera equivalente al nivel de protección	radius=35
<i>Definición de la estructura</i>	Polygons{1}.Vertices = [0 0 0;35 0 0;35 0 20;18 0 20;18 0 30;0 0 30];
	Polygons{2}.Vertices = [35 0 0;35 20 0;35 20 20;35 0 20];
	Polygons{3}.Vertices = [35 20 0;0 20 0;0 20 30;18 20 30;18 20 20;35 20 20];
	Polygons{4}.Vertices = [0 20 0;0 0 0;0 0 30;0 20 30];
	Polygons{5}.Vertices = [0 0 30;18 0 30;18 20 30;0 20 30];
	Polygons{6}.Vertices = [18 0 20;18 20 20;18 20 30;18 0 30];
	Polygons{7}.Vertices = [18 0 20;35 0 20;35 20 20;18 20 20];
	Polygons{8}.Vertices = [-50 -50 0;85 -50 0;85 70 0;-50 70 0];
Definición de los polígonos en donde se podrán ubicar puntas captadoras	Polygons{5}.PCapsEnable =true(1);
	Polygons{7}.PCapsEnable =true(1);
Definición de la primera punta captadora	PCaps = [18 0 30.5]'
Tolerancia	Tolerance = 1e-5;

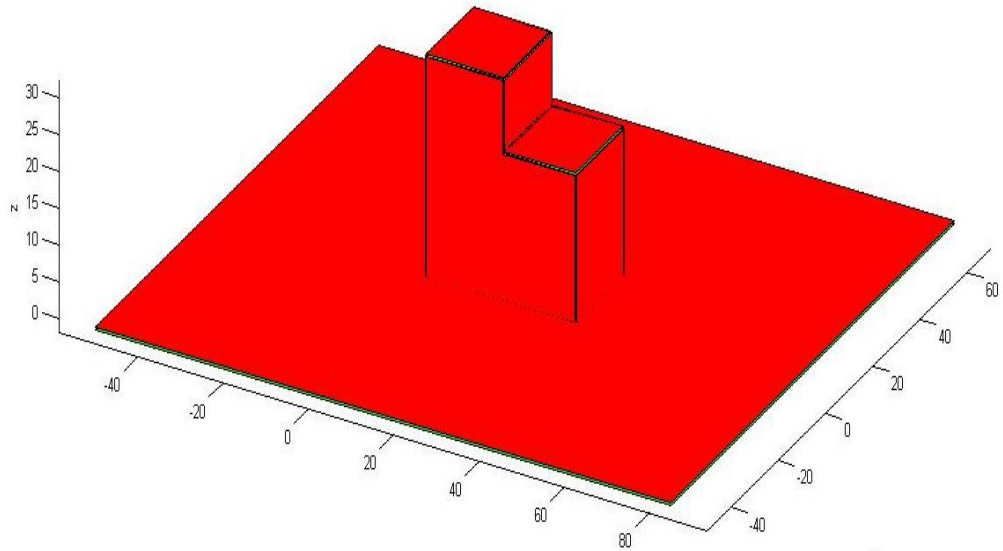
Una vez realizada la instalación de la herramienta software para el diseño del apantallamiento de estructuras de uso final en el equipo de cómputo, el software se utiliza desde Matlab, en la carpeta llamada códigos se encuentran todos los algoritmos útiles para el desarrollo de la herramienta (ver manual del usuario).

Utilizando el algoritmo RollingSphereMethod\_Estructura.m genera un modelo tridimensional de la estructura para hacer el apantallamiento del mismo mediante el método de la esfera rodante, el algoritmo empieza con la construcción de la estructura.

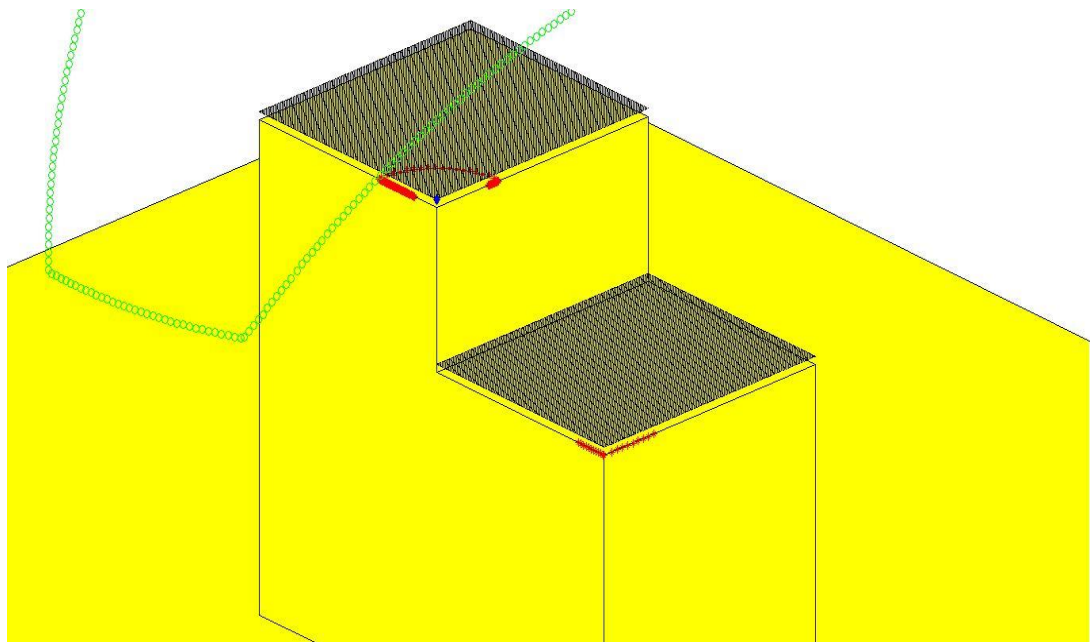
En este ejemplo se construyeron ocho (8) polígonos que conforman la estructura en forma de L. El orden en el cual se ubican los vértices del polígono definen la forma de éste y además en qué lado del polígono se pueden ubicar las esferas

que lo tocan tangente. Este lado se determina según la regla de la mano derecha, ésta es importante ya que en los polígonos es necesario definir qué lado apunta hacia afuera del polígono.

**Figura 23. Ejemplo construcción de la estructura**



**Figura 24. Posición de la primera punta captadora en la estructura**

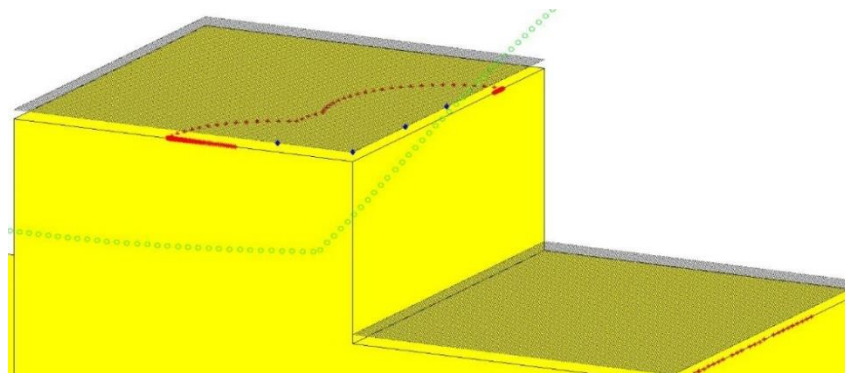


Luego de estar definida la estructura como se muestra en la figura 23, se especifica los polígonos en donde se pueden ubicar las puntas captadoras, estas siempre se instalan en los polígonos superiores ya que según la norma técnica colombiana son los puntos más altos de la estructura como se muestra en la figura 24.

Las siguientes puntas captadoras se determinan de acuerdo a los puntos del polígono en donde las esferas lo tocan tangente, éstos son los puntos en color rojo. las puntas captadoras se ingresan una tras otra, ubicando cada punta en la rejilla que es utilizada como marco de referencia sobre la superficie de la estructura, hasta eliminar todos los puntos tangentes que hacen contacto con ella, dejando toda la superficie protegida.

En la figura 25 encontramos los resultados de la distribución de 4 puntas captadoras para observar el efecto de protección sobre la estructura, y los puntos tangentes al polígono.

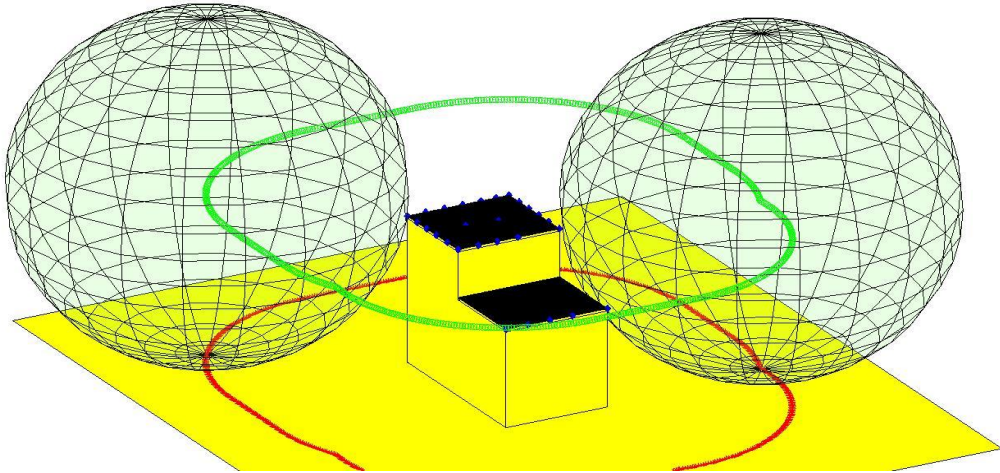
**Figura 25. Distribución de 4 puntas captadoras en la estructura**



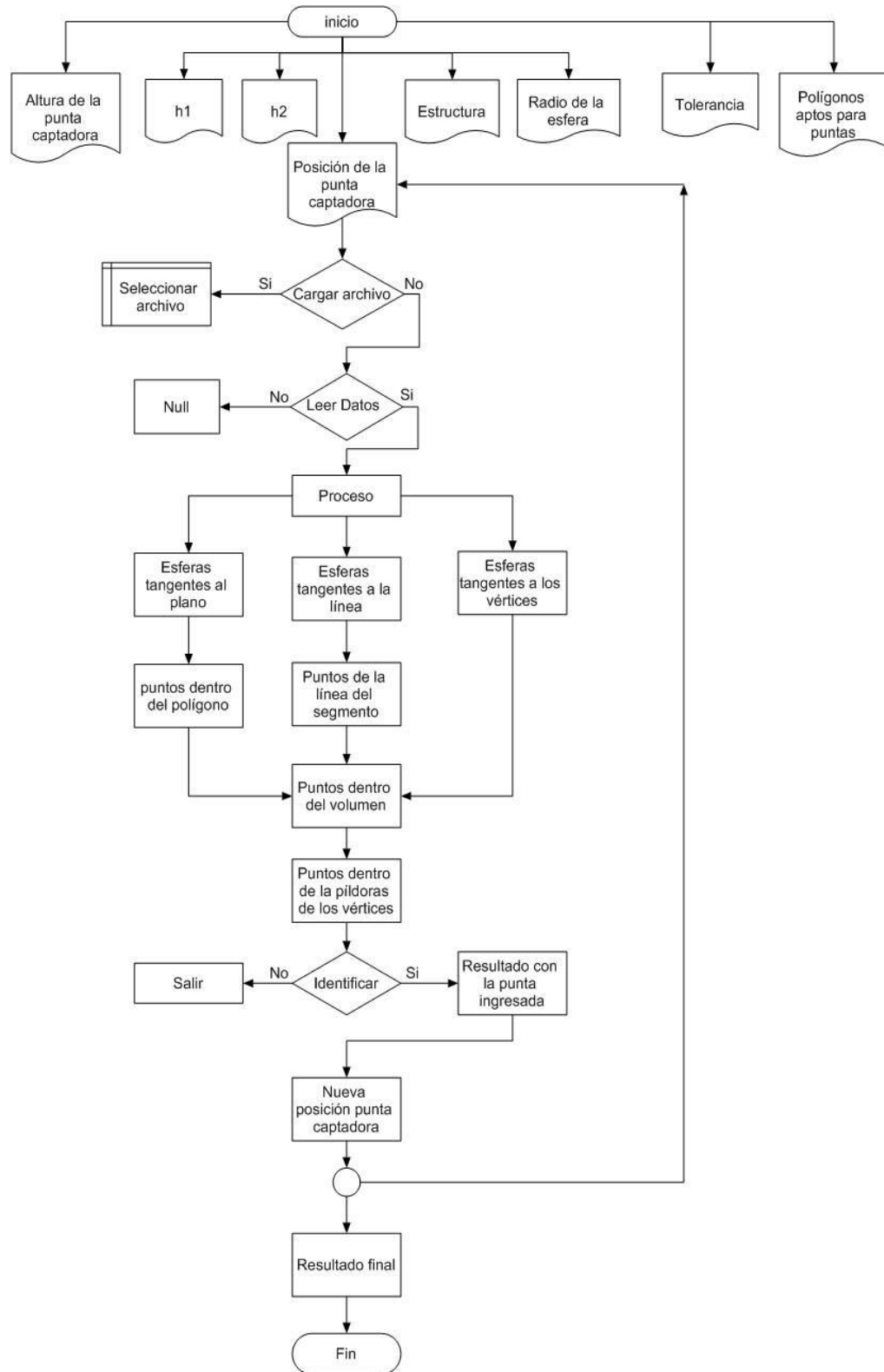
Finalmente, en la figura 26 se muestra que al ubicar las puntas captadoras correctamente se brinda una correcta protección a la edificación utilizando un modelo electrogeométrico. Los círculos en color verde describen la ruta del centro de la esfera rodante, esto es también la localización geométrica del rayo. Todas

estas descargas situadas sobre el recorrido de los centros de las esferas rodantes se descargan al punto más cercano del edificio o a tierra.

**Figura 26. Estructura en L con todas sus puntas captadoras**



## 4.1 DIAGRAMA DE FLUJO



## **5. APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA PARA ALGUNOS CASOS PRÁCTICOS EN EDIFICACIONES DE USO FINAL**

Para revisar el funcionamiento del programa, se escogieron dos edificaciones; el edificio de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander (E3T) y la iglesia de Socorro Santander.

Estas dos edificaciones arrojan como resultado la correcta posición de las puntas captadoras, en el caso del edificio de la E3T y para el análisis de estructuras complejas como la iglesia.

Con esto se pretende concluir que las puntas se ubican correctamente y a su vez se optimiza la posición de las mismas en la edificación, además se comprende el alcance del software, al ser capaz de analizar estructuras complejas como éstas.

### **5.1 VERIFICACIÓN DEL PROGRAMA EN EL EDIFICIO DE LA E3T**

Para analizar y poder comparar las respuestas, es necesario tomar los detalles de la posición de las puntas actuales ubicadas en el edificio de la e3t, como se ilustra en las figuras 27 y 28.

**Figura 27. Vista frontal del edificio de la E3T**



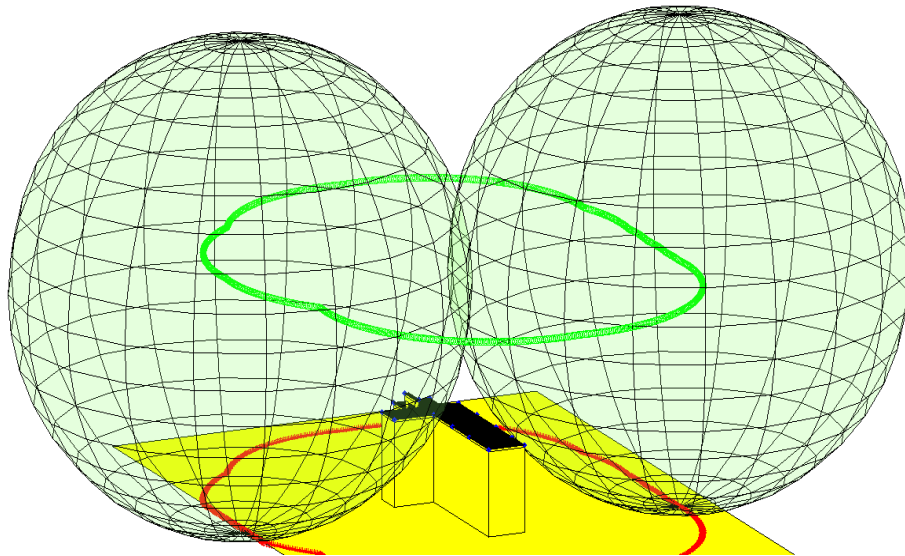
**Figura 28. Vista frontal derecha de la E3T**



Graficando la estructura, el programa genera un modelo tridimensional simplificado de la edificación con su sistema de captación, En las figuras 29 a 32 se muestra la correcta implementación del programa con dos ejemplos de estructuras, el edificio de la E3T y la Basílica de Nuestra Señora Del Socorro. Con la primera edificación se conoce la correcta posición de las puntas captadoras aplicando un nivel de protección I, ya que es un lugar muy concurrido y lleno de personas por lo tanto se necesita el nivel máximo de protección y con la catedral se pretende mostrar que el programa está desarrollado para ejecutar diferentes estructuras de complejidad arquitectónica.

Al hacer la simulación con veinticuatro (24) puntas captadoras se cubre el área de toda la estructura para el nivel de protección I, de la E3T, y catorce (14) puntas captadoras para la Basílica de Nuestra Señora del Socorro.

**Figura 29. Vista superior del edificio de la E3T aplicado al programa**

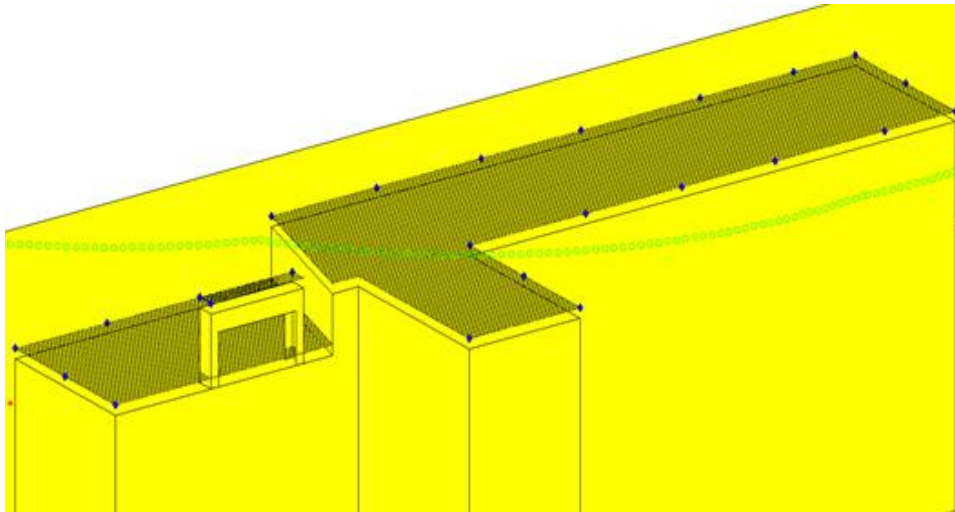


Para analizar los diferentes resultados del software para un nivel III y IV de protección en la E3T, se obtiene, que con quince (15) puntas captadoras se cubre toda el área de la estructura garantizando así una correcta protección externa

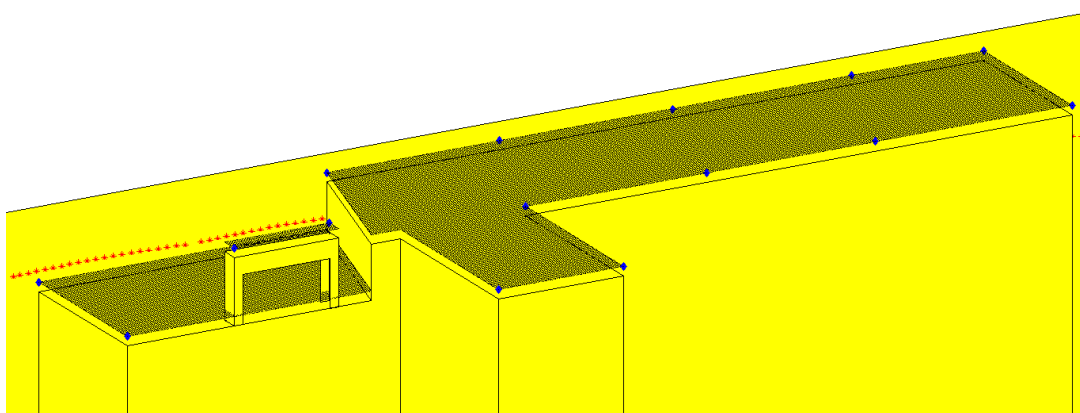
contra rayos. Ya finalizado el proceso se observa la disposición final de todas las puntas captadoras, diamante de color azul sobre la estructura.

Al analizar la figura 29 y 30, se observa que evidentemente se mantiene la proporción del sistema de captación de la E3T, es decir que el programa ubica las puntas de manera similar donde están actualmente ubicadas en el edificio con nivel de protección I y además se observa el volumen que protege cada punta captadora.

**Figura 30. disposición final de las puntas captadoras al edificio de la E3T para un nivel de protección I**



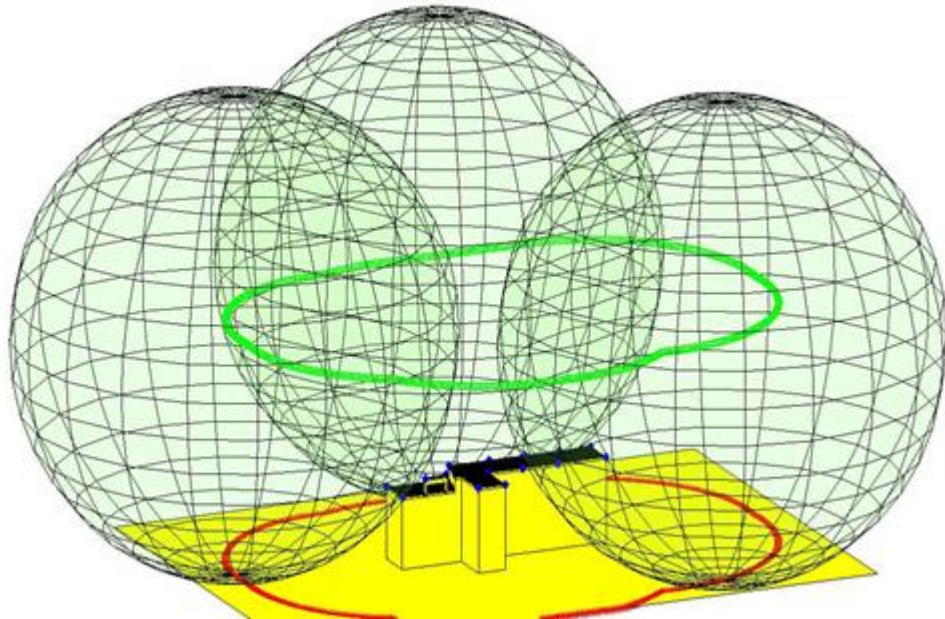
**Figura 31. Disposición final del edificio de la E3T con nivel de protección III**



Para un nivel de protección III, como se muestra en la figura 31 las puntas que aparecen en el edificio son 15, es decir menos puntas que las utilizadas en el nivel de protección I, pero manteniendo aún la proporción en la ubicación, es decir no aparece ninguna punta en ningún lado fuera del especificado en la norma.

Para el nivel IV corresponde un radio de 55 metros, al observar la figura 32, muestra como resultado 15 puntas captadoras, es decir las mismas presentadas en el nivel de protección III, lo cual se puede decir que la variación en el radio de la esfera del nivel III al nivel IV es de sólo 5 metros, por lo tanto, no se observa diferencia en el número de puntas captadoras ubicadas.

**Figura 32. Disposición final del edificio de la E3T con nivel de protección IV**



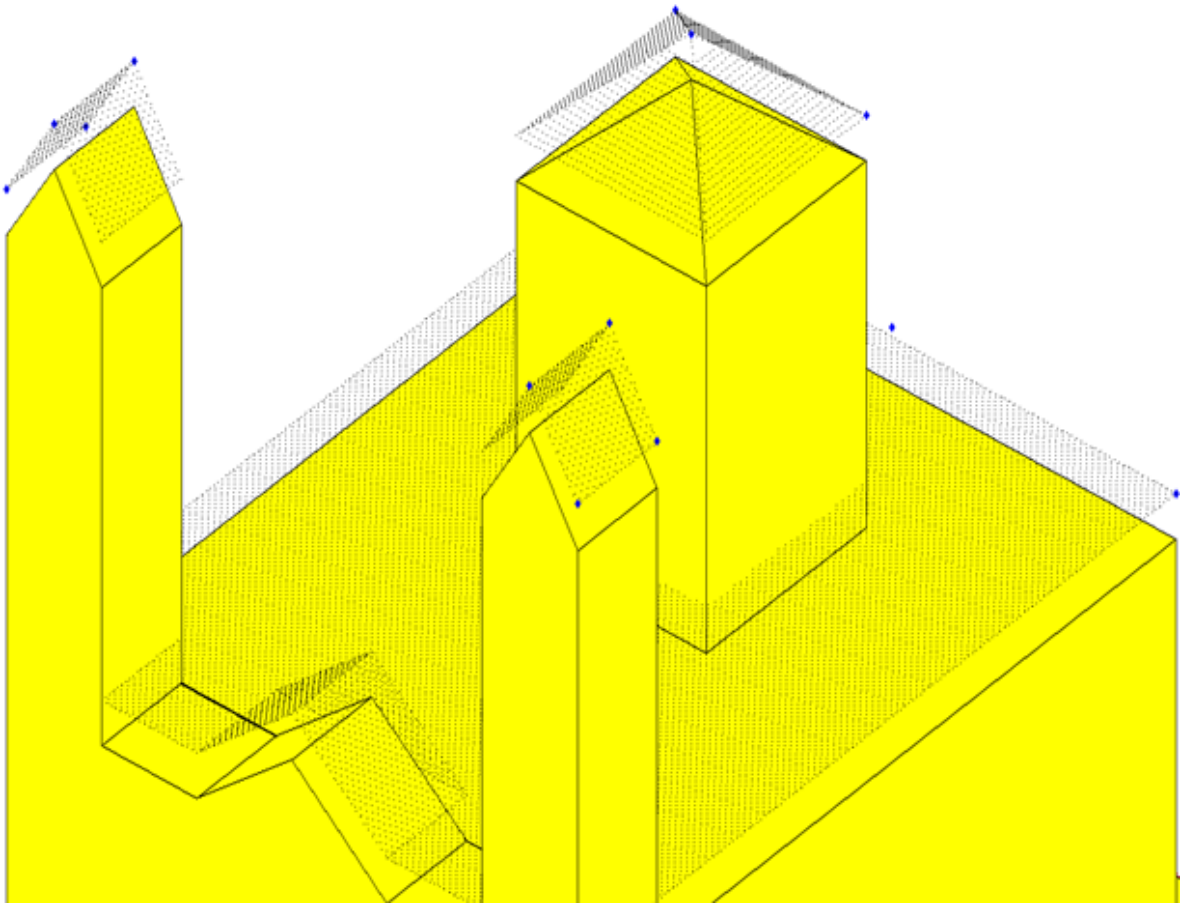
## 5.2 APLICACIÓN DEL PROGRAMA A LA BASÍLICA MENOR NUESTRA SEÑORA DEL SOCORRO SANTANDER

Para comprobar el resultado del programa para estructuras más complejas se tomó como ejemplo la Basílica del Socorro Santander como se muestra en la figura 33, es necesario notar que para este análisis lo relevante es el diseño, por lo tanto, se hace una aproximación de las dimensiones de la estructura.

**Figura 33. Basílica Menor Nuestra Señora del Socorro Santander**



**Figura 34. Disposición final de las puntas captadoras de la Basílica**



El resultado de apantallar la Basílica Menor Nuestra Señora del Socorro Santander, es coherente con lo expuesto en la reglamentación colombiana ya que los terminales de captación instalados en una estructura se deben localizar en las esquinas, puntos expuestos sobresalientes de la misma y en los bordes como se aprecia en la figura 34, además los vértices son tenidos en cuenta como puntos críticos de contacto, la proporción en la ubicación de las puntas captadoras se mantiene, y no se tienen en cuenta esquinas que están cubiertas por puntas captadoras que están a una altura mucho mayor.

En la figura 34, se evidencia que el software puede desarrollar cualquier tipo de estructura con diferentes formas, por lo tanto, el programa es una excelente herramienta para los procesos de apantallamiento de estructuras de uso final.

## 6. CONCLUSIONES

- Al describir los diferentes métodos de diseño de apantallamiento, se concluye que para cada tipo de estructura es conveniente un método de captación, ya que cada método cuenta con sus propias características que lo llevan a ser más conveniente para ciertos tipos de edificaciones, como el caso del método del ángulo, que es aplicable a estructuras con formas simples, o el método del enmallado que es útil para proteger superficies planas.
- Al ejecutar el programa para diferentes estructuras, se evidencia que la herramienta computacional realiza el apantallamiento de las edificaciones, arrojando resultados coherentes con los conceptos de la Norma Técnico Colombiana NTC-4552, concluyendo de esta manera que el programa puede analizar cualquier edificación ya que se puede modelar cada estructura en polígonos, siendo de esta forma más sencillo de analizar.
- Teniendo como parámetro de entrada las puntas captadoras, y el usuario, al poder ubicar cada punta en la estructura, se puede evidenciar los resultados de optimización al distribuir correctamente las puntas captadoras por toda la superficie, siendo esto una ventaja a la hora de ahorrar costos.
- Al ejecutar el programa para una estructura típica y variar el nivel de protección, se nota que al aumentar el nivel de protección disminuye el número de puntas en la estructura, por lo tanto, se comprueba lo expuesto en la Norma Técnico Colombiana NTC-4552, que el nivel de protección que brinda mayor seguridad es el uno (Nivel I), ya que cuenta con un radio más pequeño, que requiere ubicar más puntas.

## 7. RECOMENDACIONES

- Siendo un proyecto de difícil diseño, siempre se desea que exista un interés por mejorar el mismo, se recomienda a futuro que el método implementado se diseñe en otro ambiente gráfico, ya que Matlab es un software matemático y no gráfico, por lo tanto, no es de fácil manejo a la hora de ejecutarlo.
- Se recomienda a futuro desarrollar una mejor optimización del software, es decir, solo ingresar una vez los parámetros de entrada, y que el programa continúe ubicando las puntas automáticamente, sin necesidad de intervención del usuario, ya que con esto se mejoraría en tiempo de ejecución del programa.

## REFERENCIAS

- [1] A. L. M. GARCÍA y J. C. R. SOLANO, «PROTECCIÓN CONTRA RAYOS. SISTEMAS DE PROTECCIÓN EXTERNA PARA EDIFICACIONES DE USO FINAL,» de *PROTECCIÓN CONTRA RAYOS. SISTEMAS DE PROTECCIÓN EXTERNA PARA EDIFICACIONES DE USO FINAL*, BUCARAMANGA, UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, 2011, pp. 41-70.
- [2] N. T. C. N. 4552-3, PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS (RAYOS) PARTE 3: DAÑOS FÍSICOS A ESTRUCTURAS Y AMENAZAS A LA VIDA, BOGOTÁ D.C: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC), 2008.
- [3] H. T. SÁNCHEZ, «PROTECCIÓN CONTRA RAYOS,» de *PROTECCIÓN CONTRA RAYOS*, BOGOTÁ D.C, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2008, pp. 25-274.
- [4] N. T. C. N. 4552-1, PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS (RAYOS) PARTE 1: PRINCIPIOS GENERALES, BOGOTÁ D.C: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC), 2008.
- [5] BLITZPLANER, «MANUAL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS,» de *MANUAL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS*, MADRID,ESPAÑA, DEHN IBERICA, S.A, 2007, pp. 46-95.
- [6] N. SZEDENIK, «ROLLING SPHERE METHOD OR THEORY,» *JOURNAL OF ELECTROSTATIC*, pp. 345-350, 2001.
- [7] V. M. J. C. R.B. RODRIGUEZ, «ESTIMATION OF LIGHTNING VULNERABILITY ON WIND POWER PLANTS USING THE ROLLING SPHERE METHOD,» *JOURNAL OF ELECTROSTATIC*, pp. 774-780, 2009.
- [8] A. H. M. NASSEREDDINE, «DESIGNING A LIGHTNING SYSTEM USING

THE ROLLING SPHERE METHOD,» *SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AND ELECTRICAL ENGINEERING* , pp. 502-506, 2009.

- [9] S. B. R. S. Q. X. S. F. y F. P. D. , «SHIELDING DESIGN STUDY FOR A LARGE PLANT USING A 3-D GRAPHICS-BASES LIGHTNING INTERCEPTION SURFACE RENDERING AND INTERSECTION METHOD,» *INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION*, pp. 978-982, 2012.
- [10] M. I. I. V. B. DRAGOS LUCIAN MACHIDON, «ALGORITHM BASED ON ATTACTIVE RADIUS FOR ESTIMATING THE LIGHTINIG PROTECTION EFFICIENCY,» *IEEE*, pp. 27-32, 2014.
- [11] N. M. y D. K. , «THE DEVELOPMENT OF A 3-D ROLLING SPHERE ALGORITHM FOR LIGHTNING PROTECTION,» *IEEE*.
- [12] G. CARLIN, «THE ELECTROGEOMETRICAL MODEL OF THE ROLLING SPHERE METHOD,» *IEEE*, pp. 7-9, 2016.
- [13] C. A. A. OSORIO, G. G. CALDERÓN y G. I. C. PELÁEZ, «SOFTWARE PARA PROTECCIÓN EXTERNA CONTRA RAYOS EN EDIFICACIONES».
- [14] N. T. C. N. 4552-2, PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS (RAYOS) PARTE 2: MANEJO DE RIESGO, BOGOTÁ D.C: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC), 2008.

## BIBLIOGRAFÍA

A. H. M. NASSEREDDINE, «DESIGNING A LIGHTNING SYSTEM USING THE ROLLING SPHERE METHOD,» SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AND ELECTRICAL ENGINEERING , pp. 502-506, 2009.

A. L. M. GARCÍA y J. C. R. SOLANO, «PROTECCIÓN CONTRA RAYOS. SISTEMAS DE PROTECCIÓN EXTERNA PARA EDIFICACIONES DE USO FINAL,» de PROTECCIÓN CONTRA RAYOS. SISTEMAS DE PROTECCIÓN EXTERNA PARA EDIFICACIONES DE USO FINAL, BUCARAMANGA, UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, 2011, pp. 41-70.

BLITZPLANER, «MANUAL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS,» de MANUAL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS, MADRID,ESPAÑA, DEHN IBERICA, S.A, 2007, pp. 46-95.

C. A. A. OSORIO, G. G. CALDERÓN y G. I. C. PELÁEZ, «SOFTWARE PARA PROTECCIÓN EXTERNA CONTRA RAYOS EN EDIFICACIONES».

G. CARLIN, «THE ELECTROGEOMETRICAL MODEL OF THE ROLLING SPHERE METHOD,» IEEE, pp. 7-9, 2016.

H. T. SÁNCHEZ, «PROTECCIÓN CONTRA RAYOS,» de PROTECCIÓN CONTRA RAYOS, BOGOTÁ D.C, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2008, pp. 25-274.

M. I. I. V. B. DRAGOS LUCIAN MACHIDON, «ALGORITHM BASED ON ATTACTIVE RADIUS FOR ESTIMATING THE LIGHTINIG PROTECTION EFFICIENCY,» IEEE, pp. 27-32, 2014.

N. M. y D. K. , «THE DEVELOPMENT OF A 3-D ROLLING SPHERE ALGORITHM FOR LIGHTNING PROTECTION,» IEEE.

N. SZEDENIK, «ROLLING SPHERE METHOD OR THEORY,» JOURNAL OF ELECTROSTATIC, pp. 345-350, 2001.

N. T. C. N. 4552-1, PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS (RAYOS) PARTE 1: PRINCIPIOS GENERALES, BOGOTÁ D.C: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC), 2008.

N. T. C. N. 4552-2, PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS (RAYOS) PARTE 2: MANEJO DE RIESGO, BOGOTÁ D.C: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC), 2008.

N. T. C. N. 4552-3, PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS (RAYOS) PARTE 3: DAÑOS FÍSICOS A ESTRUCTURAS Y AMENAZAS A LA VIDA, BOGOTA D.C: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC), 2008.

S. B. R. S. Q. X. S. F. y F. P. D. , «SHIELDING DESIGN STUDY FOR A LARGE PLANT USING A 3-D GRAPHICS-BASES LIGHTNING INTERCEPTION SURFACE RENDERING AND INTERSECTION METHOD,» INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTING PROTECTION, pp. 978-982, 2012.

SEGURIDAD CON ELECTRICIDAD. Método de la esfera rodante. 14 octubre 2010. [en línea] [citado 18 de septiembre de 2016] disponible en: <http://seguridadconelectricidad.blogspot.com/2010/10/metodo-de-la-esfera-rodante.html>

SLIDESHARE. Protección externa contra rayos [en línea] [citado 25 de septiembre de 2016] disponible en: <http://www.slideshare.net/rcoo7/esfera-rodante-50634846>  
TECNOWELD. Sistema de protección contra rayos. [en línea] [citado 28 de septiembre de 2016] disponible en: [http://www.tecnoweld.com.co/index.php?option=com\\_content&view=article&id=131&Itemid=89](http://www.tecnoweld.com.co/index.php?option=com_content&view=article&id=131&Itemid=89)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓROBA. Niveles Isoceraunicos .2005. [en línea] [citado 20 de septiembre de 2016] disponible en: [www.efn.uncor.edu/departamentos/electro/lat\\_archivos/spcr/spcr.htm](http://www.efn.uncor.edu/departamentos/electro/lat_archivos/spcr/spcr.htm)

V. M. J. C. R.B. RODRIGUEZ, «ESTIMATION OF LIGHTNING VULNERABILITY ON WIND POWER PLANTS USING THE ROLLING SPHERE METHOD,» JOURNAL OF ELECTROSTATIC, pp. 774-780, 2009.

## ANEXOS

### ANEXO A MANUAL DE USUARIO

Esta herramienta computacional ha sido desarrollada en Matlab, el presente documento está dirigido a entregar la guía que se debe tener en cuenta al momento de desarrollar la aplicación a estructuras de uso final utilizando el método de la esfera rodante (MER), para garantizar el correcto funcionamiento de la herramienta software es necesario que el equipo en el cual se va a emplear cuente con unos requerimientos mínimos de hardware y software.

- ✓ Procesador de 1,5 MHz
- ✓ Memoria RAM 1 GB
- ✓ Disco duro 1 GB libre en el disco C
- ✓ Matlab R2013b o superior
- ✓ Block de notas o editor de documentos en formato .txt

Los requerimientos mínimos de hardware son recomendados y están encaminados a brindar un mejor desempeño de la herramienta durante su uso debido a las operaciones y algoritmos que este desarrolla.

### ACCESO A LA APLICACIÓN

Para acceder a la aplicación se ejecuta el icono de Matlab.

Matlab consiste en un entorno de ventanas de tres partes:

Command window: es la ventana en la que se escriben las instrucciones que se quieren ejecutar.

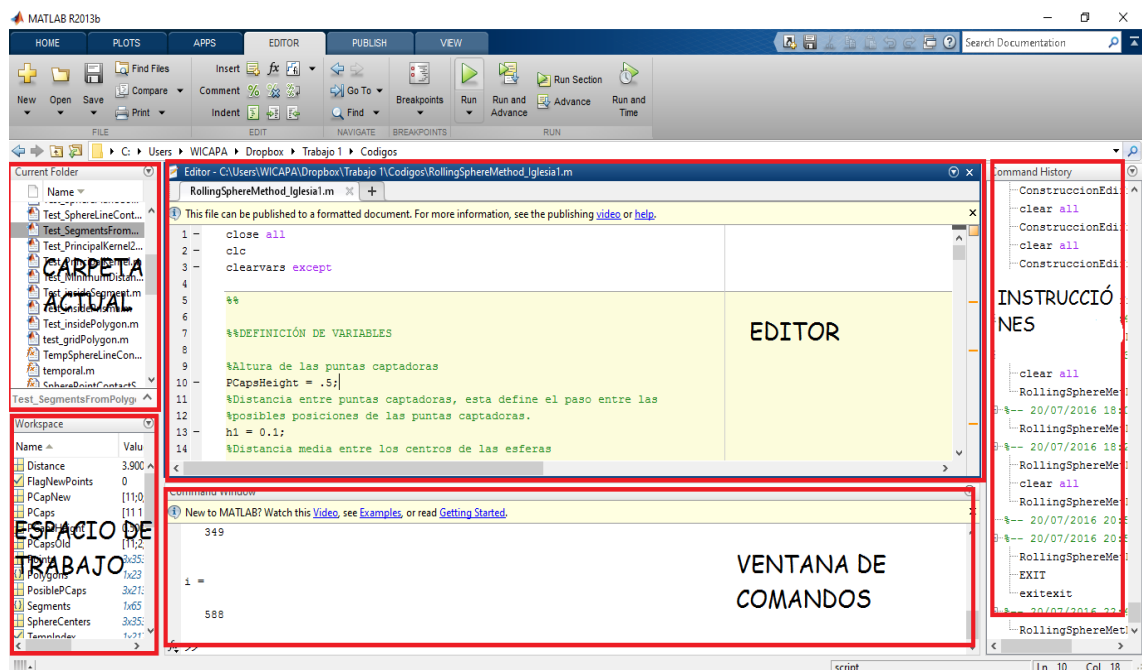


Current folder/ workspace: la primera muestra el contenido de la carpeta de trabajo se puede cambiar mediante la barra desplegable que aparece encima de las ventanas, la ventana workspace muestra la información sobre las variables y objetos definidos.

Command history: esta ventana muestra los últimos comandos (instrucciones) ejecutadas.

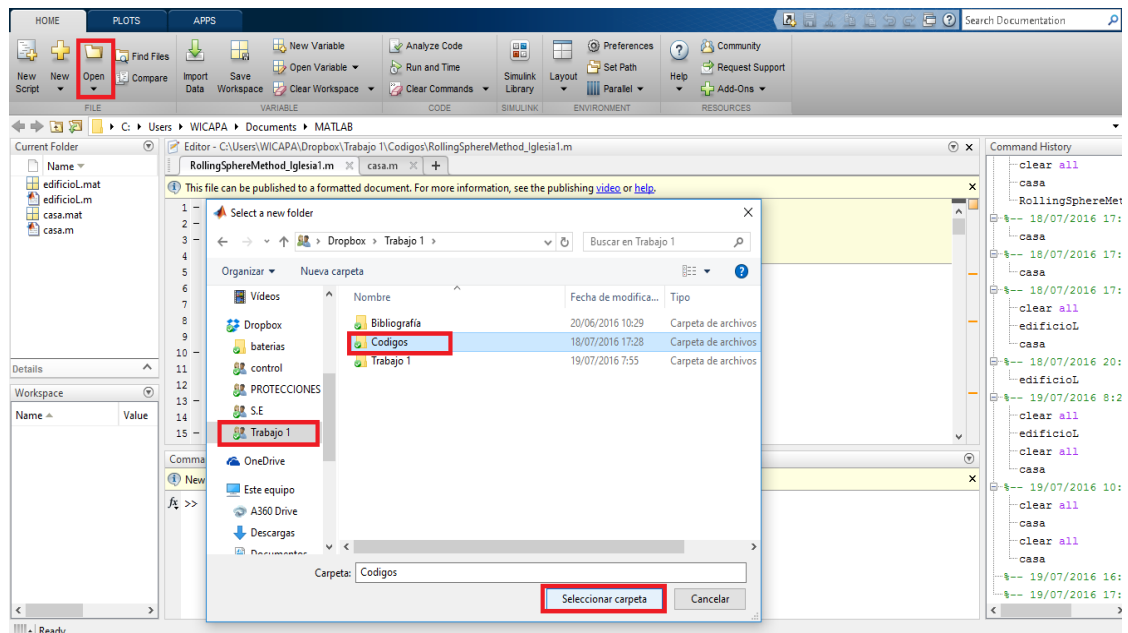
Como se muestra en la figura A1.

**Figura A1. Ventana Matlab p1**



Para empezar a utilizar el programa, en la barra despegable que aparece se selecciona (**open**), como se muestra en la figura A2, luego se selecciona la carpeta de (**trabajo1**), se elige la carpeta (**códigos**) y se selecciona la carpeta, de

**Figura A2. VENTANA Matlab p2**



esta manera se garantiza que el código utiliza todos los programas que necesita para ejecutar la herramienta computacional.

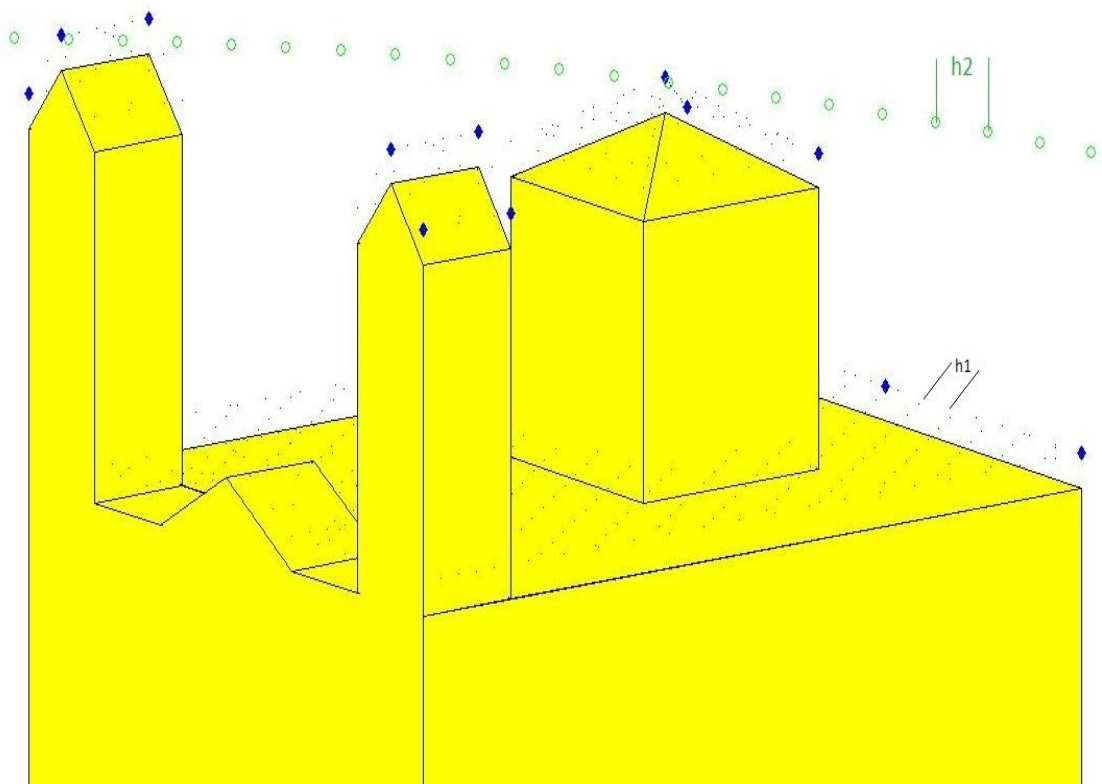
En la ventana de (**current folder**) seleccionamos **RollingSphereMethod\_Estructura.m**.

Este paso es uno de los más importantes ya que en este código se definen los parámetros de entrada, como se muestra en la figura A3, en él se define la altura de las puntas captadoras, las cuales comercialmente se encuentran desde una altura mínima de los 0,25 m hasta 2,0 m, por lo cual se trabaja con las más usadas en la industria que son de 0,5 y 0,8 metros, pero se puede seleccionar cualquiera dependiendo de la necesidad del usuario. **h1** es la distancia entre las puntas captadoras, **h2** es la distancia media entre los centros de las esferas, es decir,

entre más pequeña esta distancia, se van a ver más cercanos los puntos rojos que toca la esfera con la superficie ver figura A3. Otro parámetro de entrada es el radio de la esfera, para este caso es aconsejable que el usuario haya hecho previamente un análisis de evaluación de riesgos para edificaciones de uso final, ya que este análisis arroja el nivel de protección adecuado a utilizar en la edificación.

La tolerancia es un parámetro de entrada, que define que tan aproximado esta del cero absoluto. Ya que en programación se puede tomar diferentes valores de este número.

**Figura A3. Ilustración de  $h1$  y  $h2$**



## INGRESO DE PARÁMETROS DESDE LA VENTANA DE EDITOR

%%DEFINICIÓN DE VARIABLES

%Altura de las puntas captadoras

PCapsHeight = .5;

%Distancia entre puntas captadoras, esta define el paso entre las  
%posibles posiciones de las puntas captadoras.

h1 = 0,1;

%Distancia media entre los centros de las esferas

h2 = 0,5;

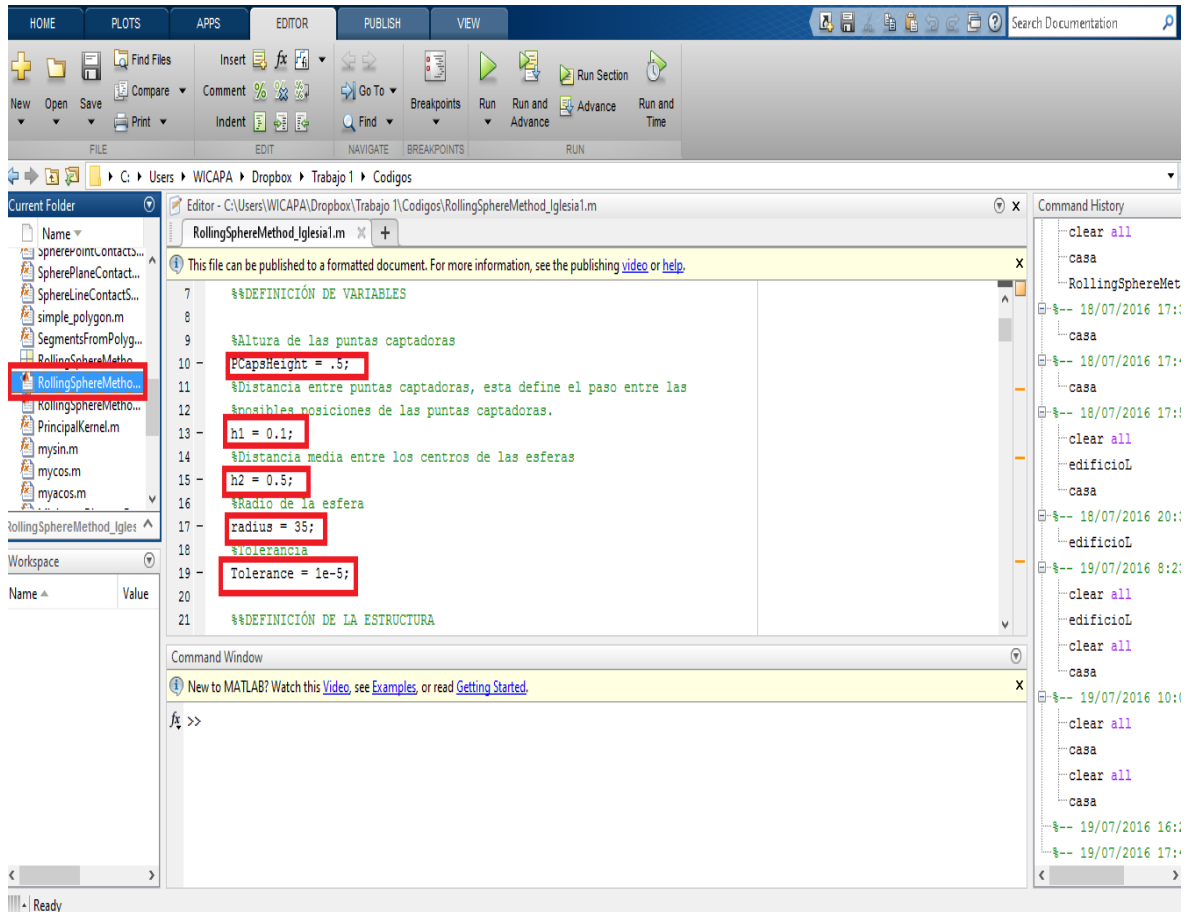
%Radio de la esfera

radius = 35;

%Tolerancia

Tolerance = 1e-5;

Figura A4. Ventana de Matlab P3



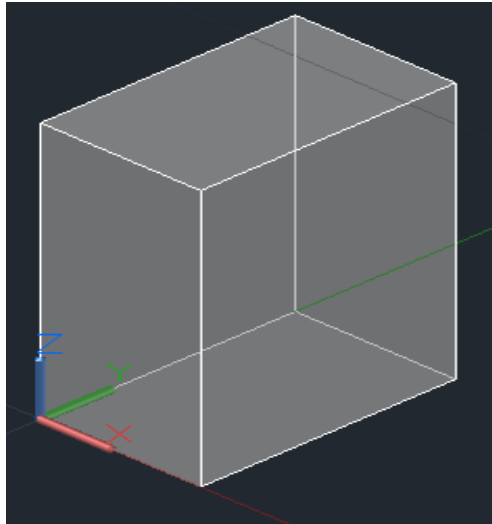
## DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

El siguiente paso es el más importante, ya que en él se define la estructura a ingresar en el programa, construyendo cada parte de la edificación por medio de polígonos. Cabe resaltar que, si este paso no se ejecuta de forma correcta, el programa no funciona.

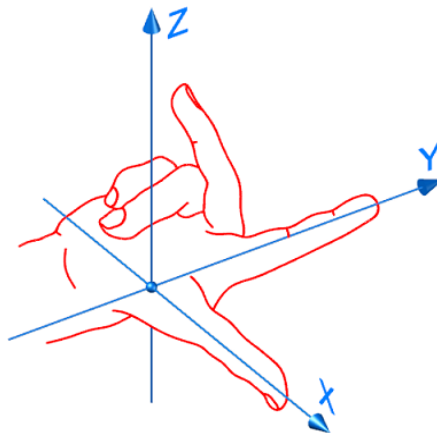
Para la elaboración de un polígono se ingresan las coordenadas X, Y, Z como se observa en la figura A5, al ingresar cada coordenada se tiene en cuenta la regla de la mano derecha, como lo muestra la figura A6, con cada polígono el vector (**X**),

siempre debe estar apuntando hacia afuera, es decir el vector x siempre debe estar perpendicular a la vista frontal.

**Figura A5. Sistema de coordenadas en 3D**



**Figura A6. Regla de la mano derecha**



Fuente: <http://a-cad-emia.blogspot.com.co/2014/01/coordenadas01.htm>

## **CONSTRUCCIÓN DE LOS POLIGONOS**

Para la construcción de los polígonos, estos se diseñan en el algoritmo que se encuentra en la carpeta de códigos, (**ConstruccionEdificación1**). Para verificar que todos están bien diseñados, al ejecutar el programa, cada polígono que

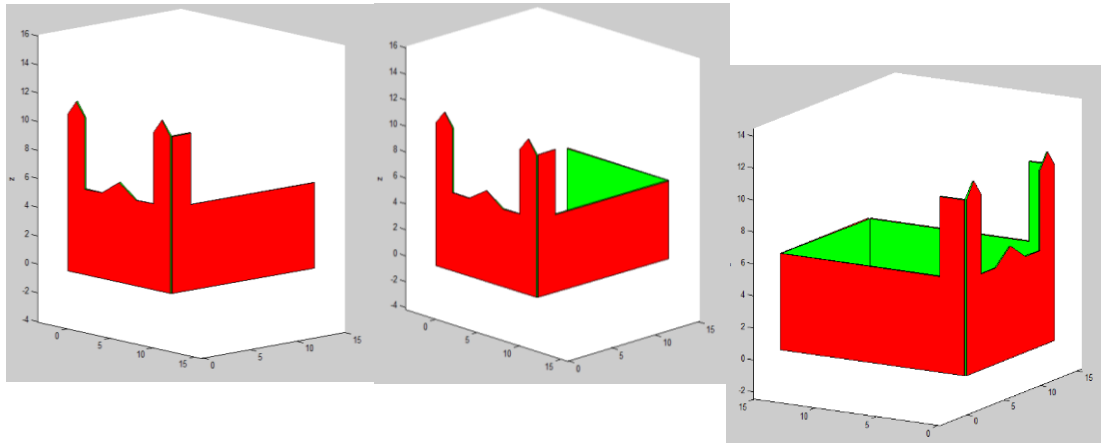
conforma la estructura deberá aparecer en color rojo como se muestra en la figura A7, si por el contrario están mal diseñados, estos aparecen en color verde. el siguiente ejemplo ilustra la forma de ingreso del polígono, se muestra la forma y dirección que deben seguir las coordenadas empezando por la coordenada (0,0,0) y empleando la regla de la mano derecha explicada anteriormente, de igual forma se continúa ingresando polígonos hasta completar todas las coordenadas que conforman la estructura. Una vez definidos todos los polígonos, se copian y se pegan en **RollingSphereMethod\_Estructura.m**. para de esta forma ejecutar la herramienta computacional.

**Figura A7. Vista de polígono frontal**

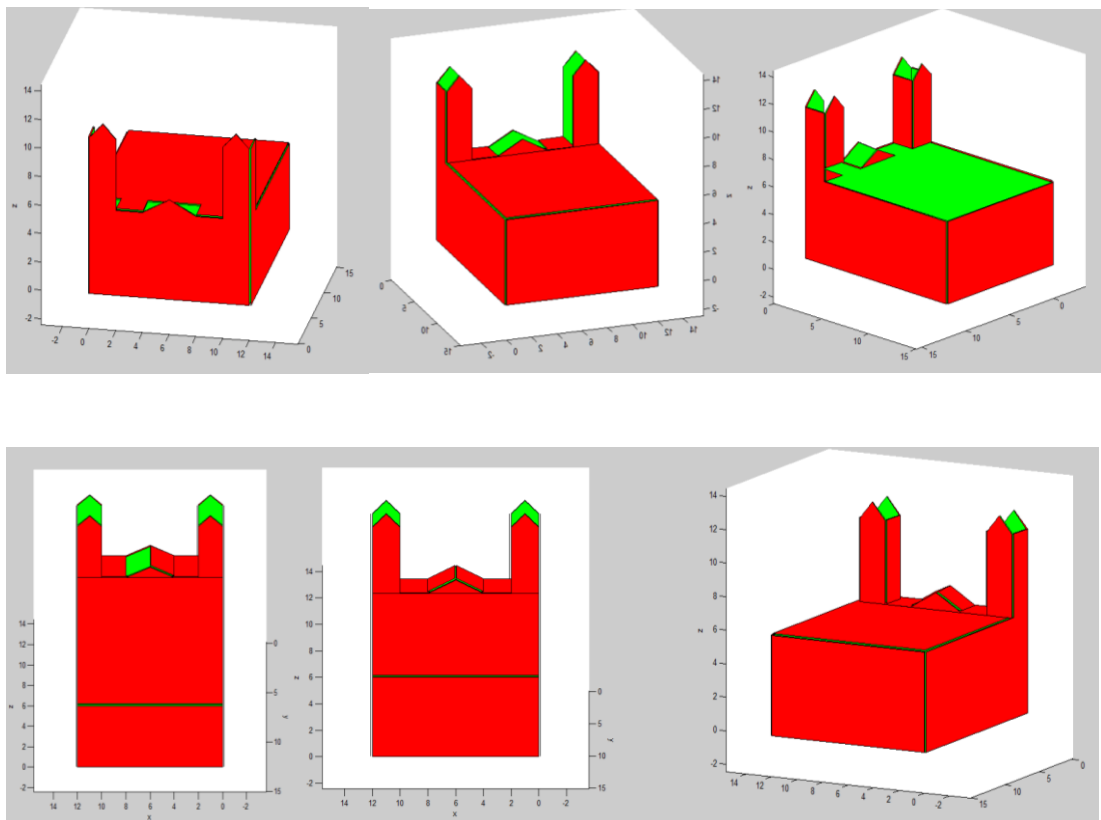


Se observa en las figuras A8 - A11 la construcción secuencial de cada uno de los polígonos que conforman la estructura. Al finalizar la edificación deseada, es importante realizar un plano de tierra (polígono inferior), de ancho mayor o igual al radio de la esfera utilizada.

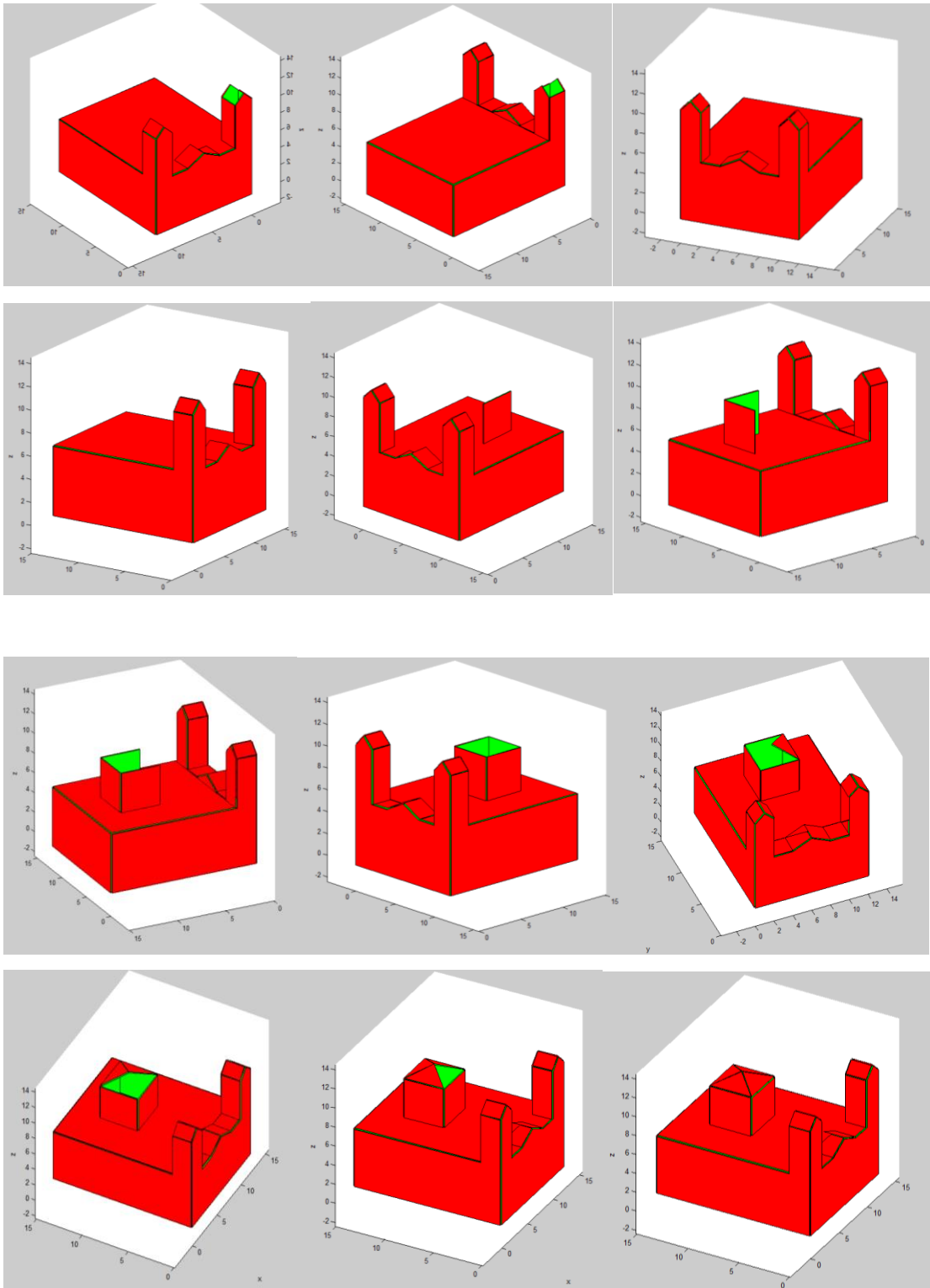
**Figura A8. Vista de los polígonos frontal-derecha-posterior e izquierdo**



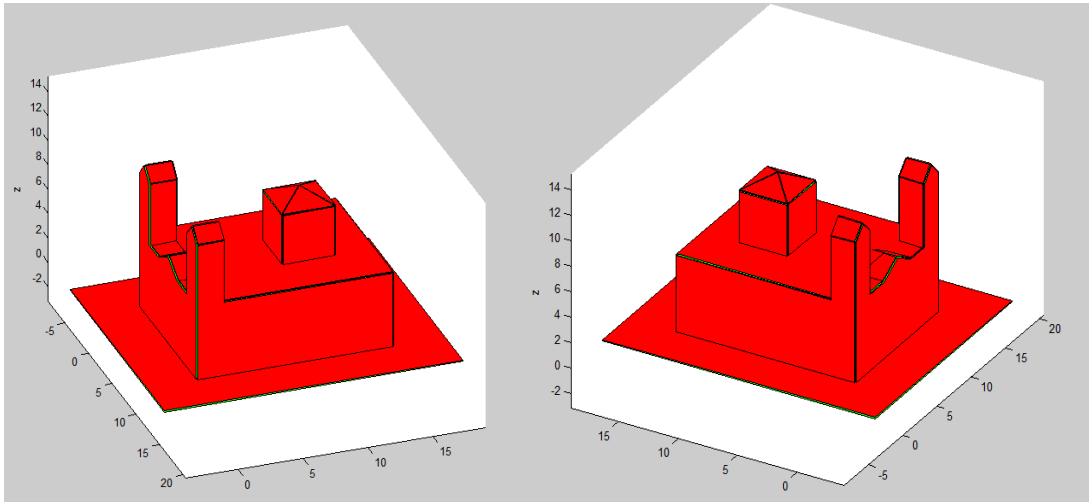
**Figura A9. Vista de los polígonos superior**



**Figura A10. Construcción de la estructura por medio de polígonos**



**Figura A11. Vista de la estructura completa más polígono inferior**



Es importante resaltar que cada uno de los polígonos construidos se almacenan en un vector llamado **Polygons{i}.Vertices=[X Y Z], i=1...N**, como se muestra en la siguiente línea de código.

### %%DEFINICIÓN DE LOS POLIGONOS

*%Polygon{i} contiene las vertices de la i-ésima cara del edificio*

```
Polygons{1}.Vertices = [0 0 0; 12 0 0; 12 0 11; 11 0 12; 10 0 11; 10 0 6; 8 0 6; 6 0 7; 4 0 6; 2 0 6; 2 0 11; 1 0 12; 0 0 11];
```

```
Polygons{2}.Vertices = [12 0 0; 12 15 0; 12 15 6; 12 2 6; 12 2 11; 12 0 11];
```

```
Polygons{3}.Vertices = [12 15 0; 0 15 0; 0 15 6; 12 15 6];
```

```
Polygons{4}.Vertices = [0 0 0; 0 0 11; 0 2 11; 0 2 6; 0 15 6; 0 15 0];
```

```
Polygons{5}.Vertices = [12 0 6; 12 15 6; 0 15 6; 0 2 6; 2 2 6; 2 0 6; 4 0 6; 4 2 6; 8 2 6; 8 0 6; 10 0 6; 10 2 6; 12 2 6];
```

```
Polygons{6}.Vertices = [12 2 6; 0 2 6; 0 2 11; 1 2 12; 2 2 11; 2 2 6; 4 2 6; 6 2 7; 8 2 6; 10 2 6; 10 2 11; 11 2 12; 12 2 11];
```

```

Polygons{7}.Vertices = [2 0 6; 2 2 6; 2 2 11; 2 0 11]';
Polygons{8}.Vertices = [4 0 6; 6 0 7; 6 2 7; 4 2 6]';
Polygons{9}.Vertices = [8 0 6; 8 2 6; 6 2 7; 6 0 7]';
Polygons{10}.Vertices = [10 0 6;10 0 11;10 2 11; 10 2 6]';
Polygons{11}.Vertices = [12 0 11;12 2 11;11 2 12; 11 0 12]';
Polygons{12}.Vertices = [10 0 11;11 0 12;11 2 12; 10 2 11]';
Polygons{13}.Vertices = [2 0 11;2 2 11;1 2 12; 1 0 12]';
Polygons{14}.Vertices = [0 0 11;1 0 12;1 2 12; 0 2 11]';
Polygons{15}.Vertices = [8 8 6;8 12 6;8 12 10; 8 8 10]';
Polygons{16}.Vertices = [8 12 6;4 12 6;4 12 10; 8 12 10]';
Polygons{17}.Vertices = [4 12 6;4 8 6;4 8 10; 4 12 10]';
Polygons{18}.Vertices = [4 8 6;8 8 6;8 8 10; 4 8 10]';
Polygons{19}.Vertices = [8 8 10;8 12 10;6 10 11]';
Polygons{20}.Vertices = [8 12 10;4 12 10;6 10 11]';
Polygons{21}.Vertices = [4 12 10;4 8 10;6 10 11]';
Polygons{22}.Vertices = [4 8 10;8 8 10;6 10 11]';
Polygons{23}.Vertices = [-4 -4 0;16 -4 0;16 19 0; -4 19 0]';

```

## **DEFINICIÓN DE LOS POLIGONOS EN LOS CUALES SE PUEDE UBICAR LA PUNTA CAPTADORA**

Los polígonos que conforman la parte superior de la estructura, deben nombrarse como los polígonos en los cuales se puede ubicar la punta captadora, con base en esto, el programa construye otro polígono de la altura de la punta captadora, creando una grilla (malla), con el fin de visualizar paso a paso las posibles opciones de ubicar la siguiente punta captadora.

Definida la estructura, seleccionamos los polígonos en los cuales se puede ubicar las puntas captadoras. La siguiente línea de código muestra este proceso.

```

%mastPolygonIndex(5) = 1;
%mastPolygonIndex(8) = 1;
%mastPolygonIndex(9) = 1;

```

```
%mastPolygonIndex(11) = 1;  
%mastPolygonIndex(12:14) = 1;  
%mastPolygonIndex(19:22) = 1;
```

**%DEFINICIÓN DE LOS POLÍGONOS EN DONDE SE PODRIAN UBICAR LAS PUNTAS**

**%CAPTADORAS**

```
for i = 1:numel(Polygons)  
    Polygons{i}.PCapsEnable = false(1);  
end
```

```
Polygons{5}.PCapsEnable =true(1);  
Polygons{8}.PCapsEnable =true(1);  
Polygons{9}.PCapsEnable =true(1);  
Polygons{11}.PCapsEnable =true(1);  
Polygons{12}.PCapsEnable =true(1);  
Polygons{13}.PCapsEnable =true(1);  
Polygons{14}.PCapsEnable =true(1);  
Polygons{19}.PCapsEnable =true(1);  
Polygons{20}.PCapsEnable =true(1);  
Polygons{21}.PCapsEnable =true(1);  
Polygons{22}.PCapsEnable =true(1);
```

### **DEFINICIÓN DE LAS PRIMERAS PUNTAS CAPTADORAS**

Al definir la primera punta captadora, es importante iniciar con el punto más alto de la estructura, seguidamente se ingresa esta coordenada en la variable Pcaps = [ X Y Z], como se ilustra en el ejemplo, es necesario resaltar que la dimensión de esta coordenada es un vector columna de 3xN.

Ejemplo de ingreso de variable

PCaps = [11 2 12.5];

## EJECUCIÓN DEL PROGRAMA

Para ejecutar el código es aconsejable que en el (command folder), es decir en la ventana en la cual se escriben las instrucciones se digite (clear all), que automáticamente borra todas las variables usadas. Seguidamente se oprime RUN o F5, aparece un cuadro de dialogo como se muestra en la figura A12, el cual pregunta (**¿Desea cargar las puntas captadoras de un archivo? SI o NO**), si es la primera vez que ejecutamos el código le damos que **NO**, ya que este funciona para el caso que el usuario, en medio de la ejecución del programa se equivoque, el algoritmo automáticamente se guarda, y le permite después cargar el archivo con las puntas captadoras que ya se hubieran ingresado antes, todo esto, es a través de un archivo.txt como se muestra en la figura A13, que en este caso sería (RollingSphereMethod\_Estructura.txt), al ejecutar el programa, inmediatamente le carga las puntas que llevaba en la anterior ejecución, permitiéndole terminar de ubicar todas las puntas captadoras en la estructura.

Figura A12. Ventana de Matlab P4

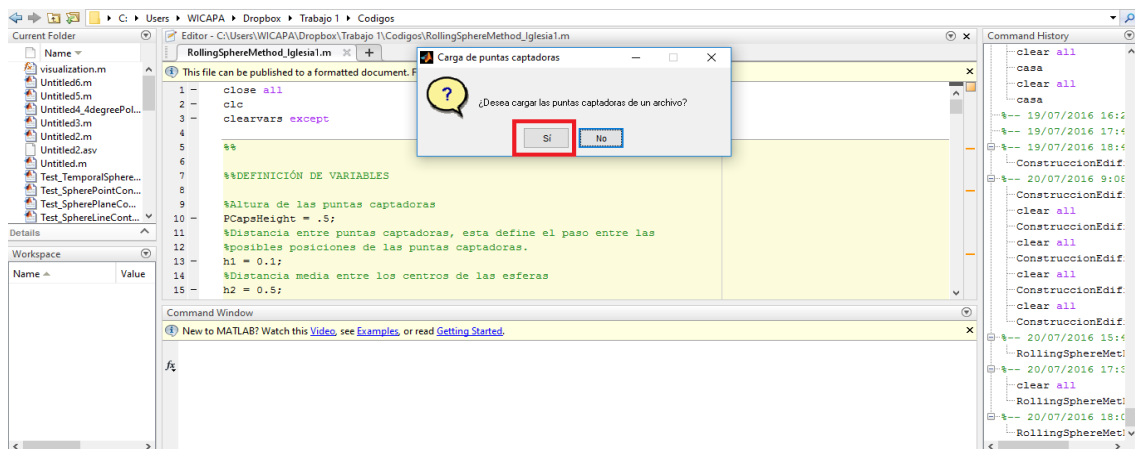
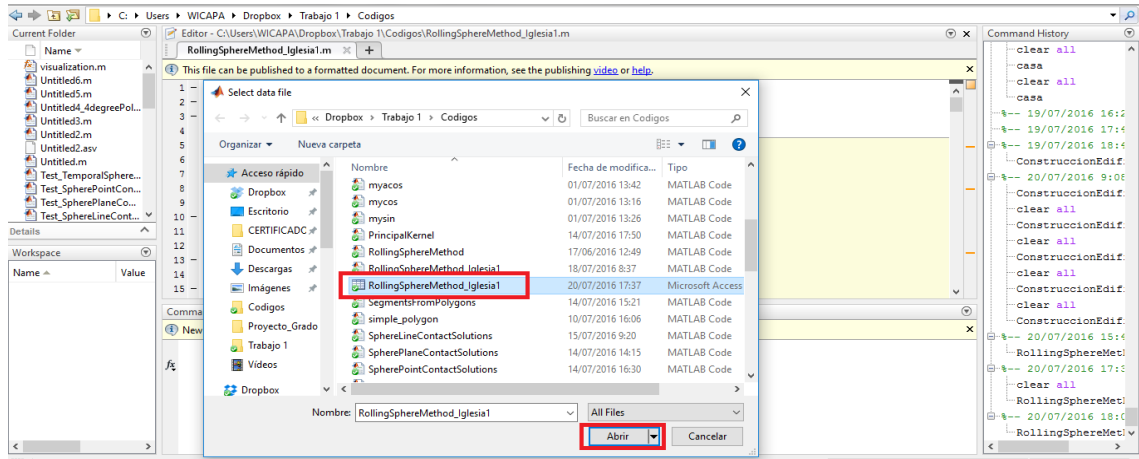


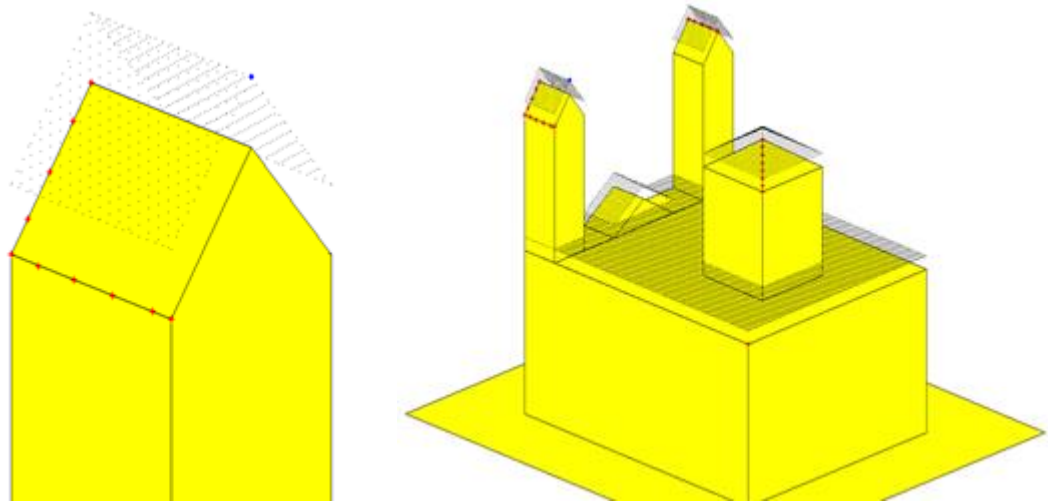
Figura A13. Ventana de Matlab P5



Al tener la primera punta captadora, el código empieza a buscar las otras posiciones de las demás puntas captadoras manualmente. En caso de que aparezca un (**Warning**), significa que cuando el usuario previamente haya ingresado dos o más puntas captadoras, y en alguna de ellas no protegió nuevos puntos, lleva a entender, que la nueva punta ingresada, no ejerce ninguna función de protección, ya que las anteriores estas protegiendo esta área.

Como resultado a la punta ingresada, el programa arroja una primera imagen, como lo muestra la figura A14, en la cual se observa la estructura con una grilla, con altura semejante a la punta captadora. Se evidencia la posición de la primera punta captadora (diamante en azul), para que el usuario analice la siguiente posición de la nueva punta captadora, y de esta manera, con cada iteración, los puntos (**ROJOS**) que son los puntos tangentes en que la esfera hace contacto con el polígono y el plano, disminuyan.

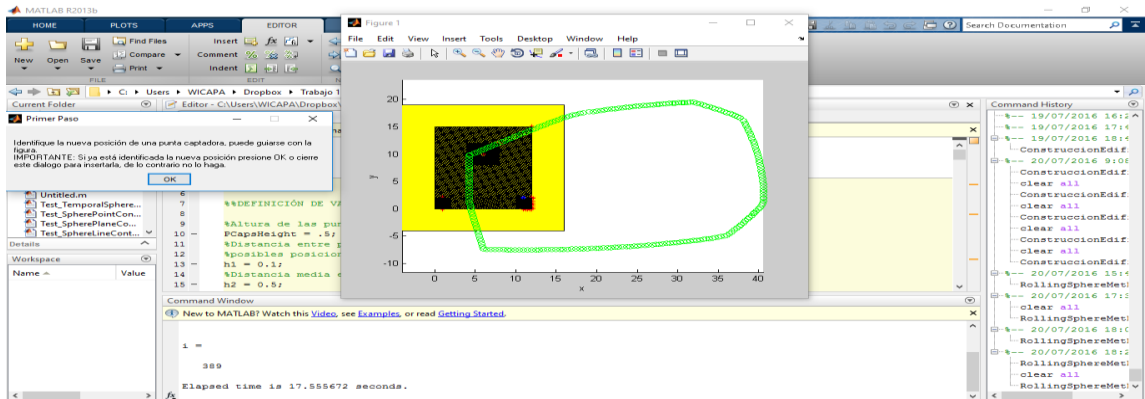
**Figura A14. Dibujo tridimensional de la estructura y la posición de la punta captadora**



simultáneamente, con la figura A14, aparece un cuadro de diálogo “Identifique la nueva posición de una punta captadora, puede guiarse de la figura 1. IMPORTANTE si ya está identificada la nueva posición presione OK o cierre este diálogo para insertarla, de lo contrario no lo haga”

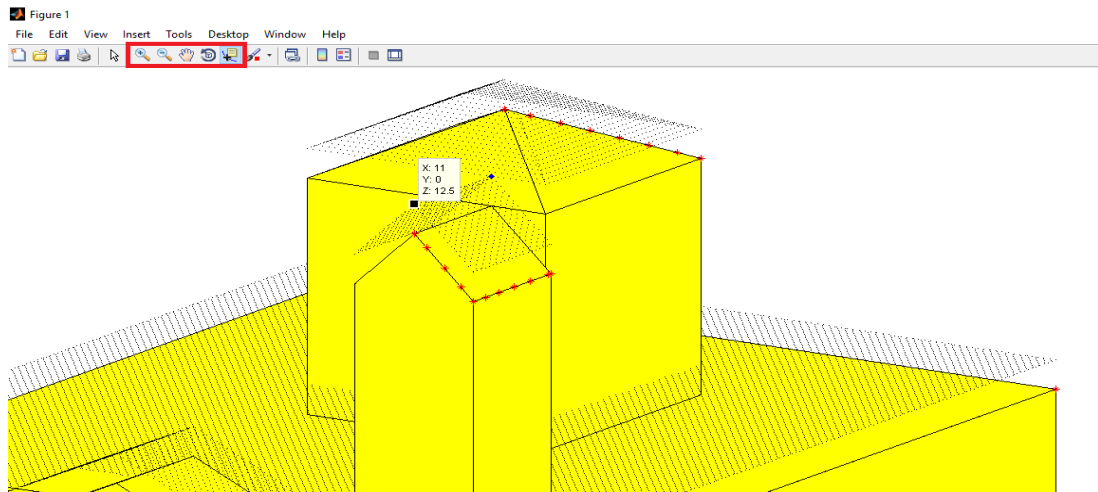
Como se puede evidenciar, este cuadro de diálogo nos brinda una información de advertencia como se muestra en la figura A15, para escoger la siguiente posición de la punta a ingresar.

**Figura A15. Ventana Matlab P6**

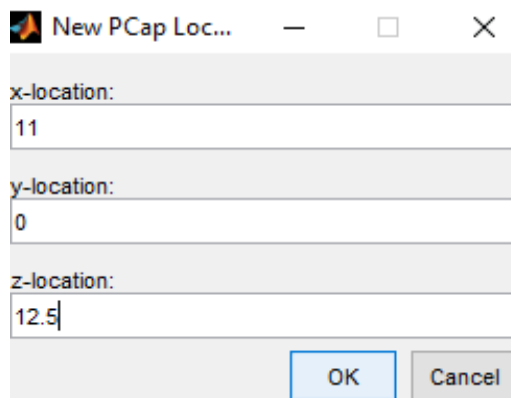


Al seleccionar la nueva posición de la punta captadora en el polígono superior y ayudado de la rejilla como se muestra en la figura A16. Al tener el punto seleccionado en la rejilla, le damos OK al cuadro de diálogo, cabe resaltar que es importante no cerrar el cuadro de diálogo sin antes definir la posición de la punta, porque de no ser así le impedirá moverse por la figura anterior, por lo cual no podrá visualizar la posición de la nueva punta captadora.

**Figura A16. Dibujo tridimensional de la estructura y posición de la punta captadora**



**Figura A17. Ingreso de datos de la punta captadora**

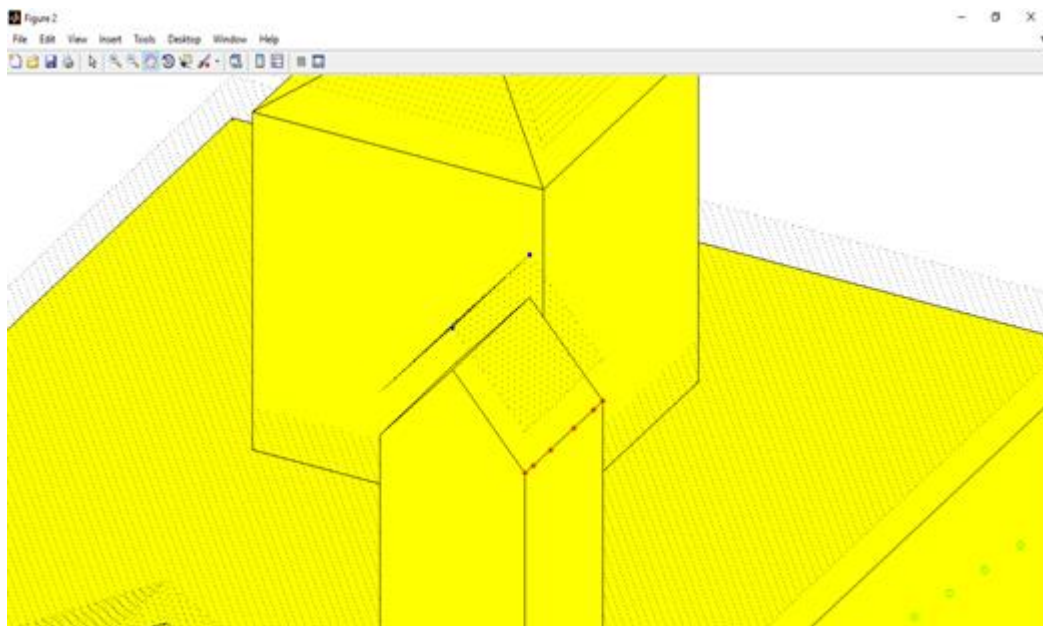


Seguidamente aparecerá otro cuadro de diálogo en el cual es necesario ingresar las posiciones X, Y, Z, como se indica en la figura A17, al darle OK se construye la

solución con esa nueva punta captadora, al oprimir cancelar el programa se sale de todo dando por terminada la ejecución.

El programa resuelve para la punta ingresada, sucesivamente aparece otro cuadro de diálogo “Está de acuerdo con la nueva posición de la punta captadora”, inmediatamente se visualiza una nueva figura 2 y una figura 1, es decir, el antes y el después, con el fin de hacer una comparación de resultados del apantallamiento de cada punta.

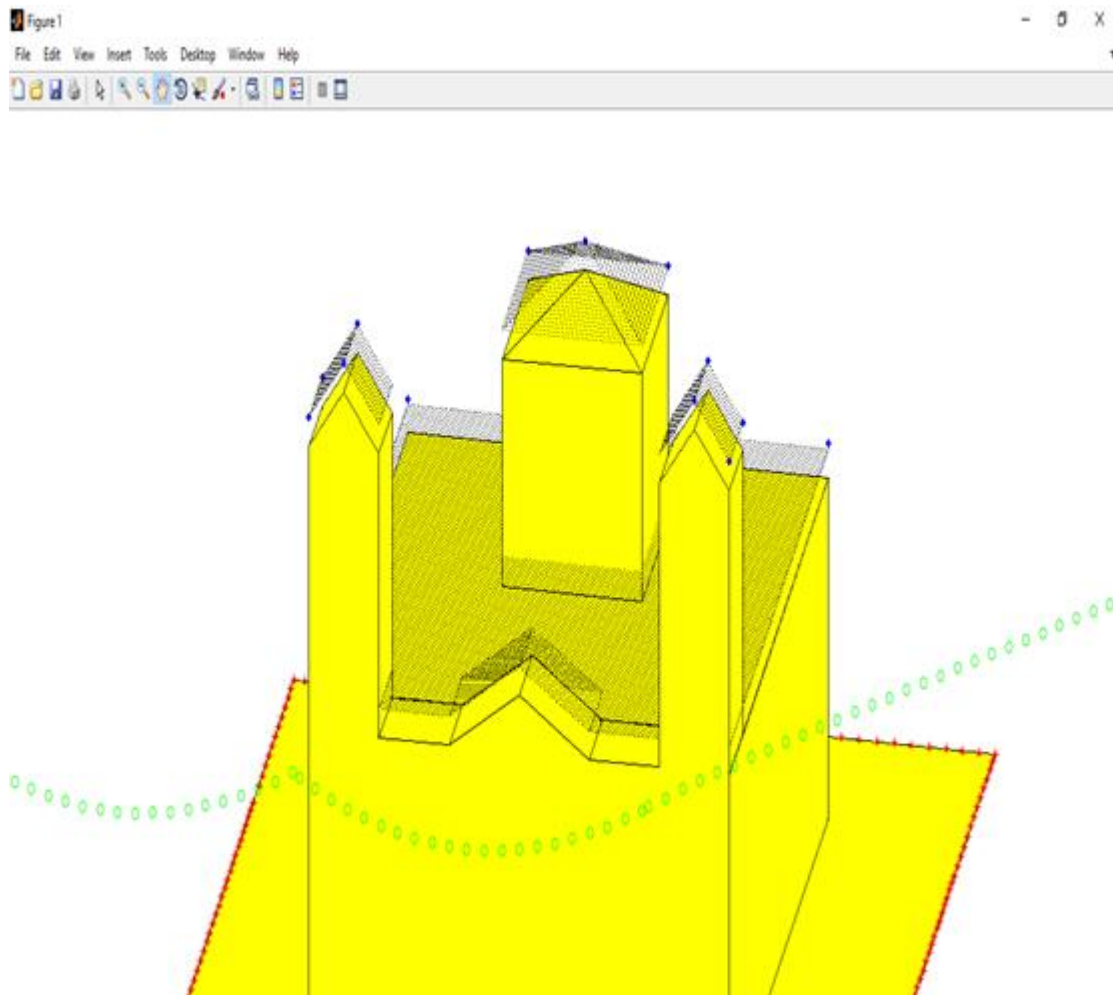
**Figura A18. Posiciones de dos puntas captadoras**



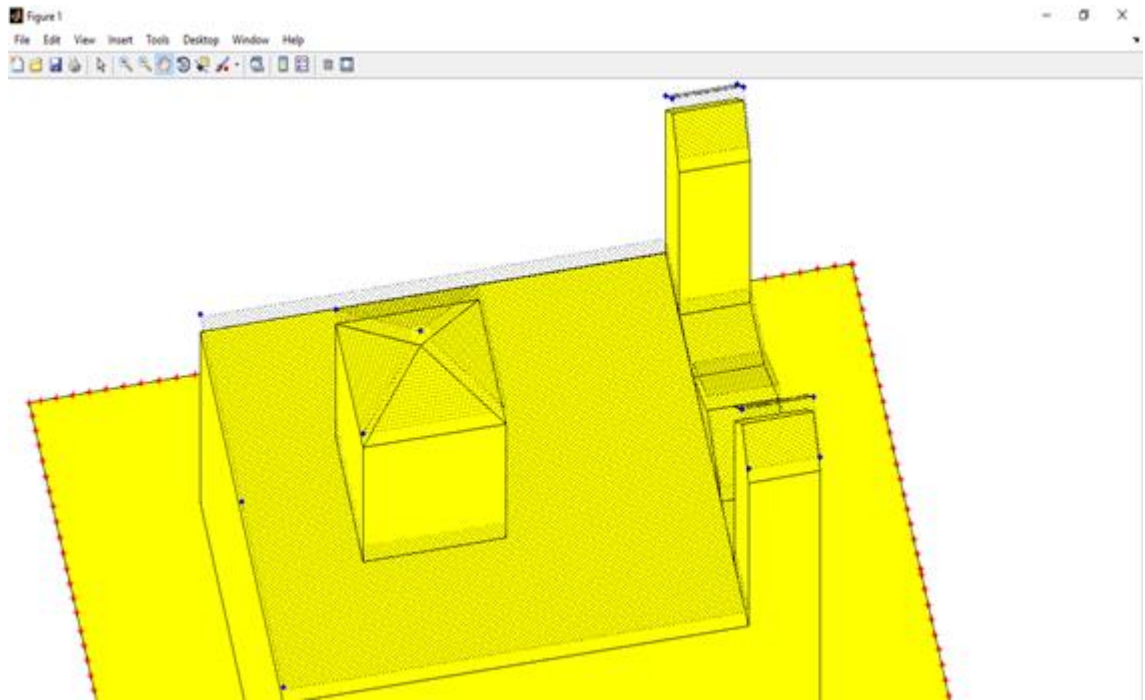
Al realizar la comparación, un cuadro de diálogo pregunta “¿está de acuerdo con la nueva posición de la punta captadora?” **SI o NO**, al decidir SI, aceptamos esta nueva posición, por el contrario, si no es la posición de la nueva punta captadora, seleccionamos NO, y vuelve al paso anterior, para escoger una nueva posición de la punta captadora. Cuando salen estos cuadros de dialogo en donde usted debe ingresar una información, el programa bloquea todo el resto y no puede abrir ni ejecutar otra cosa, responde y pasa a una nueva iteración, de igual forma vuelve a

preguntar, así iterativamente hasta completar todas las puntas captadoras que apantallan la estructura. Al terminar el programa con todas las puntas instaladas sobre los polígonos, se selecciona cancelar y automáticamente termina la ejecución, arrojando como resultado la ubicación de todas las puntas captadoras sobre la estructura a proteger diamante en color azul como se muestra en las siguientes figuras A19-A21.

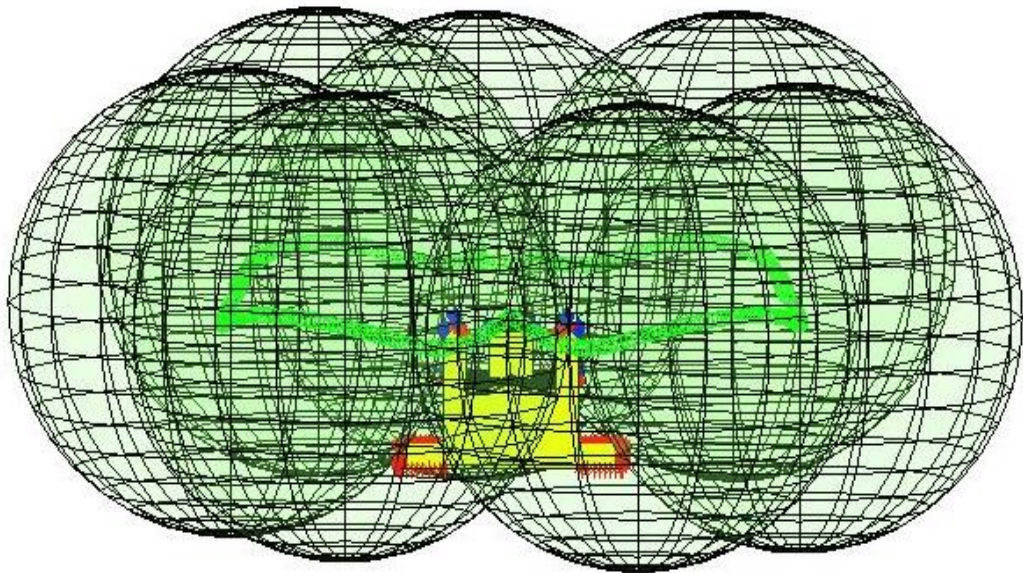
**Figura A19. Dibujo tridimensional de la ubicación de todas las puntas captadora**



**Figura A20. Dibujo tridimensional de la estructura con sus punta captadoras**



**Figura A21. Estructura protegida por el volumen de las esferas**



## ANEXO B. PROCEDIMIENTO MATEMÁTICO DE LOS ALGORITMOS

### ✓ Sphere Plane Contact Solution

El algoritmo halla los puntos *SphereCenters* (SC) a los cuales se les asocia unas esferas que tienen como plano tangente al plano  $\pi_1$ . Si se tiene  $p$ , se dice que  $p \in \pi_1$  si y sólo si  $(p-PlanePoint), (PlaneNormalVector)=0$ , Siendo *PlanePoint* ( $P_1$ ) un punto en el plano, y *PlaneNormalVector* ( $V_1$ ) un vector de magnitud uno y ortogonal al plano  $\pi_1$ , y que además cumplen con  $\|SpherePoint-SphereCenters\|=radius$ , siendo *SpherePoint* ( $P_2$ ) un punto definido por la altura de la punta, comprendiendo estas como un parámetro de entrada, se tiene en cuenta el *radius* ( $r$ ) esté definido como otro parámetro de entrada. Por cada *SphereCenters* se asocia un punto en  $\pi_1$  llamado *Points* ( $P$ ). El parámetro  $h$  define la distancia entre los *SphereCenters* hallados. Los puntos y vectores ingresados deben ser vectores columna de 3 dimensiones, así si se resuelven  $N$  *SphereCenters*, y en consecuencia  $N$  *Points*, estos tendrán las dimensiones de  $3 \times N$ .

El algoritmo Sphere Plane Contact Solution está contituido por 4 pasos descritos matemáticamente. Los tres primeros definen la ubicación del punto  $P_2$  como punto guía para el respectivo giro de la esfera, la rotación que se hace en el cuarto paso es por el método algebraico de la ecuación de Rodríguez.

#### Primer paso

Si la distancia de  $P_2$  al plano  $\pi_1$  es mayor a  $2.r$  entonces:

Los parámetros  $P$  y SC estarán vacíos.

#### Segundo paso

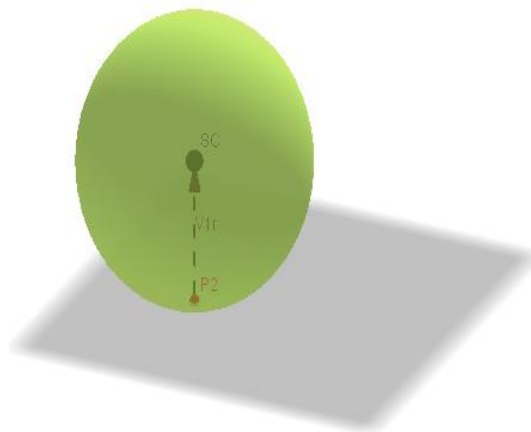
Si  $P_2$  pertenece al plano  $\pi_1$  entonces:

$$P(:,1) \leftarrow P_2.$$

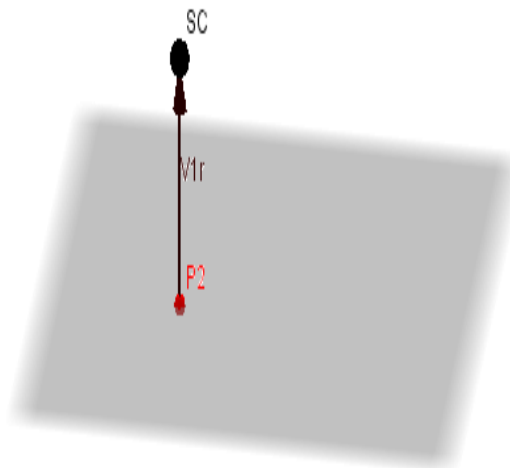
$$SC(:,1) \leftarrow P_2 + r \cdot V_1.$$

Siendo  $P(:,1)$  la primera solución, lo que nos indica que el punto que toca el plano tangente  $P_2$  es el mismo de la esfera como se ilustra en las figuras B1 y B2.

**Figura B1. Ubicación del SC y P si  $P_2 \in \pi_1$**



**Figura B2 Ubicación del SC y P si  $P_2 \in \pi_1$**



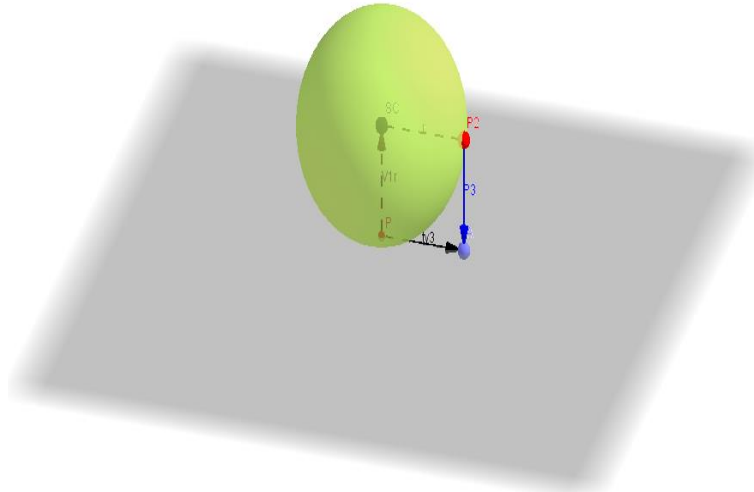
### Tercer paso

Si  $P_2$  está entre 0 y  $2 \cdot r$

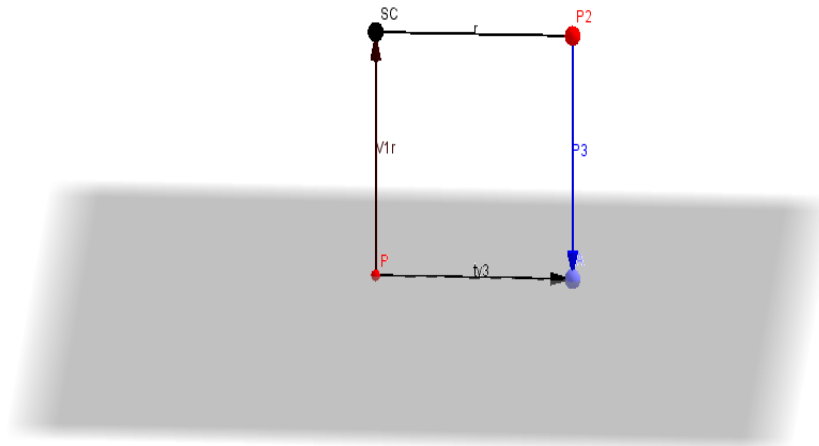
Hacemos la proyección del punto  $P_2$  al plano,  $P_3 \leftarrow \text{Proy}_{\{\pi_1\}} \cdot P_2$ .

El punto  $P_3$  hace parte ahora de la recta en el plano  $l_1$ , de tal forma que ahora la incógnita a resolver es la constante  $t$ , tal que  $P \leftarrow P_3 + t.V_3$ , como se ilustra en las figuras B3 y B4.

**Figura B3. Ubicación del SC y P, si  $P_2$  está en el intervalo de  $0 < P_2 < 2.r$**



**Figura B4. Ubicación del SC y P, si  $P_2$  está en el intervalo de  $0 < P_2 < 2.r$**



Para el cálculo de la constante que conforma la recta  $l_1$ , de las figuras B5 y B6 se observa las tres condiciones para hallar el primer punto  $P$  y primer punto  $SC$ :  $\{P,$

SC:  $P = P_3 + t \cdot V_3 \wedge \|SC - P_2\| = r \wedge SC = P + r \cdot V_1$  y con base en estas ecuaciones obtenemos la constante  $t$  que define la distancia entre el punto  $P_3$  y el punto  $P$ . Como ecuación final tenemos  $\{t : t_1^2 + \|P_3 - P_2 + r \cdot V_1\|^2 = r^2\}$ .

Cuarto paso

Ubicados los puntos de *SphereCenters* y *Points* se hacen girar las esferas alrededor de las puntas definidas por los puntos  $P_2$ .

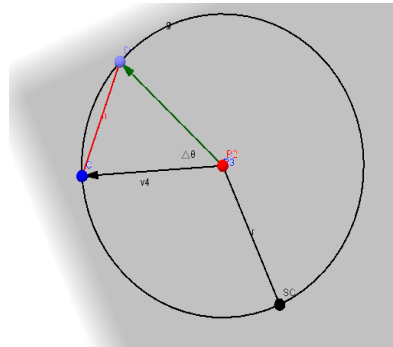
Se define el diferencial de tetta ( $\Delta\theta$ ),  $\Delta\theta \leftarrow 2\arcsin\left(\frac{h}{2r_1}\right)$  que es el paso a paso de la rotación en un dominio  $\frac{-\pi}{2} \leq \Delta\theta \leq \frac{\pi}{2}$ . y

Por medio de la ecuación de rotación de Rodriguez

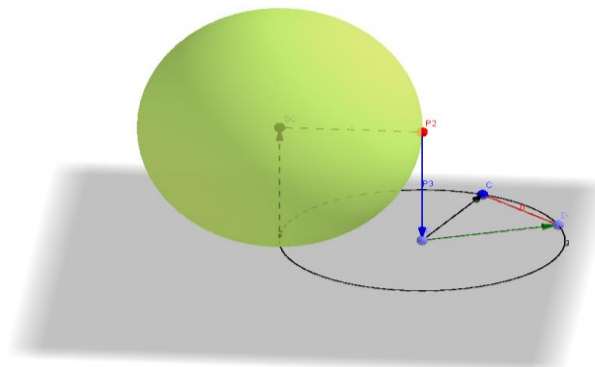
$$V_{4rot} = V_4 \cos(\Delta\theta) + (V_1 \times V_4) \sin(\Delta\theta \cdot i) .$$

Se gira el vector  $V_4$  como se ilustra en la figura B5 y B6.

**Figura B5. Rotación de la esfera por medio del vector  $V_4$**



**Figura B6. Rotación de la esfera por medio del vector  $V_4$**



### Sphere Line Contact Solution

El algoritmo halla los puntos *SphereCenters* a los cuales se les asocia unas esferas que tienen como recta tangente a la recta  $l_1$ ,  $p \in l_1$  si y solo si  $p = \text{linePoint} + t \cdot \text{ParallelVector}$  Para algún  $t \in \mathbb{R}$ , y que además cumplen con  $\|\text{SpherePoint} - \text{SphereCenters}\| = \text{radius}$ . Por cada *SphereCenters* se asocia un punto en  $l_1$  llamado *points*. El parámetro  $h$  define la distancia entre los *SphereCenters* hallados. Los puntos y vectores ingresados deben ser vectores columna de 3 dimensiones, así si se resuelven  $N$  *SphereCenters*, y en consecuencia  $N$  *Points*, estos tendrán las dimensiones de  $3 \times N$ . Además, se espera que  $\|\text{ParallelVector}\| = 1$ .

Los puntos *SphereCenters* que se hallan corresponden a las intersecciones entre la superficie de la esfera  $S_1$ ,  $p \in S_1$  si solo si  $\|p - \text{SpherePoint}\| = \text{radius}$ , y la superficie del cilindro  $C_1$ ,  $p \in C_1$  si y solo si

$$\|p - \text{LinePoint}\|^2 - (\text{ParallelVector}, p - \text{LinePoint})^2 = \text{radius}^2$$

La superficie del cilindro  $C_1$  tiene como eje a la recta  $l_1$  y además cortes transversales a la recta  $l_1$  de esta superficie resultan círculos de radio *radius*

Igual al algoritmo anterior se analizan los dominios a los cuales se encuentra el punto  $P_2$ :

#### Primer paso

Construcción de la recta  $l_1$ .

$p \in l_1$  Si y solo si:  $p = P_1 + t \cdot V_3$  para algún  $t \in \mathbb{R}$ .

Construcción de la superficie de la esfera  $S_1$ .

$p \in l_1$  Si y solo si:  $\|p - P_2\| = r$

Construcción de la superficie del cilindro  $C_1$ .

$$p \in C_1 \text{ Si y solo si: } \|p - P_1\|^2 - (V_1, p - P_1)^2 = r^2$$

Se proyecta el punto  $P_2$  sobre la recta  $l_1$ ,  $P_3 \leftarrow \text{Proy}_{\{l_1\}} P_2$ , buscando la creación de  $V_2 = P_2 - P_3$ , siendo  $\|V_2\|$  la distancia más pequeña de  $P_2$  a la recta  $l_1$

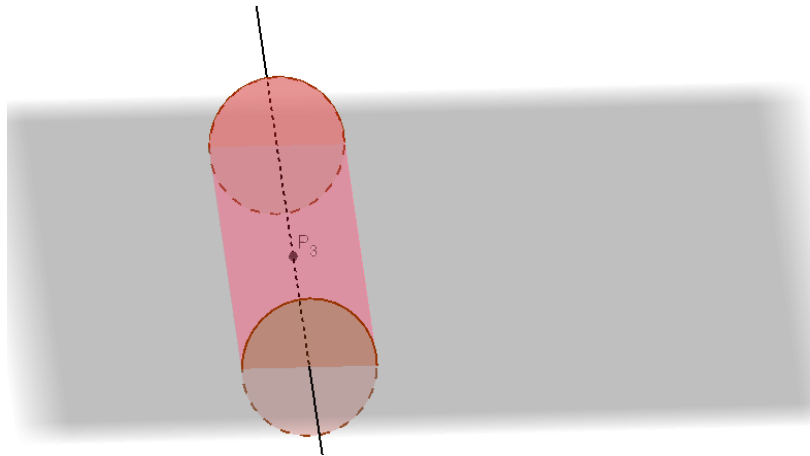
### Segundo paso

Si  $\|V_2\| > 2.r$  entonces el cilindro  $C_1$  y la superficie de la esfera  $S_1$  no se interceptan. Por lo tanto, el resultado de Los parámetros  $P$  y  $SC$  estará vacíos.

### Tercer paso

Si  $P_2 \in l_1$ , entonces  $P_2 \in l_1$  lo que nos indica que  $\|V_2\| = 0$ , es decir que el punto  $P_2$  corresponderá al centro del círculo como se indica la figura B7.

**Figura B7. Punto  $P_2 \in l_1$ , y que es SC**



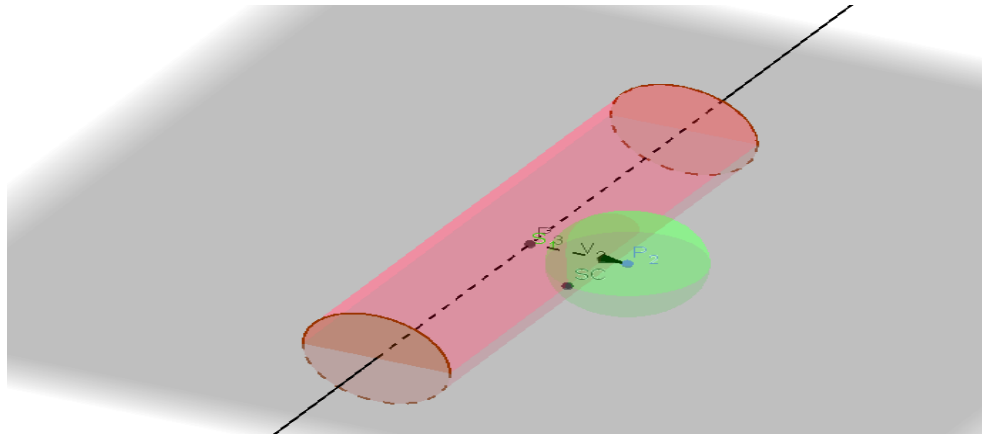
### Cuarto paso

Si hay intercepción entre el cilindro  $C_1$  y la superficie de la esfera  $S_1$ , hallamos el primer punto  $P$  y primer  $SC$ , como se ilustra en la figura B8.

Si  $P \in l_1$  y:  $SC = P + r.V_2$  entonces  $SC \in C_1$ .

Si  $\|SC - P_2\| = r$ , entonces  $SC \in C_1$ .

**Figura B8. Intercepción entre  $C_1$  y  $S_1$**



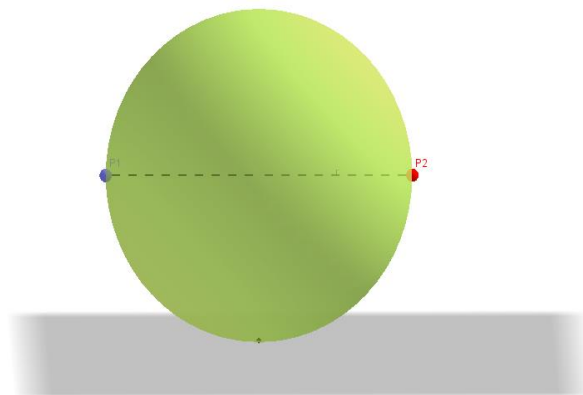
✓ **Sphere Point Contact Solution**

Al algoritmo halla los puntos *Spherecenters* a los cuales se les asocia unas esferas que cumplen con  $\|points(P_1) - SphereCenters(SC)\| = radius(r)$  y con  $\|Spherepoints(P_2) - SC\| = r$ . Por cada *SphereCenters* se asocia un punto llamado *points*. El parámetro  $h$  define la distancia entre los *SphereCenters* hallados. Los puntos y vectores ingresados deben ser vectores columna de 3 dimensiones, así si se resuelven  $N$  *SphereCenters*, y en consecuencia  $N$  *points*, estos tendrán las dimensiones de  $3 \times N$ .

Primer paso

Al definir el vector como  $V_1 \leftarrow P_2 - P_1$ , como se indica en la figura B9. Para  $\|V_1\| > 2r$ , entonces  $SC$  es vacío y  $P$  vacío.

**Figura B9. Definición del vector  $V_1$**



### Segundo paso

Si la norma del vector uno es cero,  $\|V_1\| > 0$  en este caso los puntos  $SC$  son muestras espaciadas de una esfera con centro en  $P_2$ .

Definimos el *Spherecenters* como:  $SC = P_2 + r \cdot V_1$

### Tercer paso

Giramos el vector  $r$  en el espacio para definir el giro de la esfera. Es importante saber que al girar el vector  $r$ , es necesario conocer los deltas de giro, con las coordenadas  $z, y$  ( $\Delta\theta$ ) y con las coordenadas  $x, y$  ( $\Delta\Phi$ ).