

# Universidad de Alcalá

## Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería Sistemas de Telecomunicación



### Trabajo Fin de Grado

Diseño y estudio de “Corner-reflectors” para sistemas radar  
utilizando la herramienta software POFACTS

ESCUELA POLITECNICA

**Autor:** Antonio Corredor Pedrero

**Tutor/es:** David de la Mata Moya

2016

**UNIVERSIDAD DE ALCALÁ**  
**Escuela Politécnica Superior**

**Grado en Ingeniería Sistemas de Telecomunicación**

**Trabajo Fin de Grado**

**Diseño y estudio de “Corner-reflectors” para sistemas radar  
utilizando la herramienta software POFACETS**

**Antonio Corredor Pedrero**

**Director: David de la Mata Moya**

TRIBUNAL:

Presidente: Pilar Jarabo Amores

Vocal 1º: Enrique Alexandre Cortizo

Vocal 2º: David de la Mata Moya



## AGRADECIMIENTOS

Parecía que nunca llegaría este momento, pero al final puedo gritar... ¡Por fin!, no ha sido fácil y han sido muchísimas y muy grandes las piedras con las que me he ido encontrando por el camino, piedras que a veces las he cargado con gusto, piedras que con trabajo, constancia y entusiasmo las he quitado del medio y otras que te paran en seco... y haces plantearte tu mundo, pero todas necesarias para llamar a esto vida.

No son pocas las personas que me han ayudado a transportar estas piedras o a moverlas del camino, compañeros, profesores y amigos, gracias David por ser mi tutor y ponerme las cosas fáciles, gracias Víctor por tu apoyo y tus ánimos, te lo agradezco de corazón, a mi tío Luis Javier por ser una referencia, a Ernesto e Isabel por vuestra ayuda, a David y Patricia gracias por vuestros ánimos y por teneros cerca, a mis hermanos Ales y Vero, por teneros siempre que os necesito y sentir vuestro calor, a mis padres que siempre creyeron que acabaría, pero gran parte del “éxito” se lo debo a Valvanera, gracias por animarme a presentarme a esos exámenes en los que no tenía esperanza a pesar de haber estudiado y al final aprobé, gracias por cubrirme, gracias por tu paciencia, apoyo y cariño, gracias por darme en este último tramo las piedras más ligeras del camino Vega, Leo y Adria, las cuales han sido fundamentales para afrontar el final de carrera con más fuerza y ánimo, en conclusión gracias por ver siempre más allá del hollín.

*“Hace más el que quiere que el que puede”*



# INDICE

RESUMEN.....	11
ABSTRACT.....	12
PALABRAS CLAVE.....	13
ACRONIMOS.....	13
RESUMEN EXTENDIDO.....	15
MEMORIA .....	19
1 INTRODUCCION .....	19
1.1 ¿QUE ES UN CORNER REFLECTOR?.....	19
1.2 IMPORTANCIA DE LOS CORNER REFLECTORS .....	22
1.3 APLICACIONES CRs. SATELITES OBSERVACION TIERRA.....	23
1.4 POFACETS.....	24
2 BASE TEORICA .....	31
2.1 RADAR CROSS SECTION (RCS) .....	31
2.2 ELECCION DE DIMENSIONES, SECCION DEL CR Y MATERIAL DE CONSTRUCCION.....	33
2.3 MONOESTATICO VS BIESTATICO .....	39
3 BASE EXPERIMENTAL .....	41
3.1 DISEÑO DE LOS CRs .....	41
3.2 MEDIDAS.....	43
3.2.1 ESTIMACIONES DE RCS MONOESTÁTICA .....	44
3.2.2 ESTIMACIONES DE RCS BIESTATICA .....	53
CONCLUSIONES .....	64
BIBLIOGRAFIA.....	67



## INDICE IMÁGENES

<i>Imagen 1: RCS producido por un avión de combate</i> .....	15
<i>Imagen 2: CR utilizado como referencia para la calibración de un satélite SAR</i> .....	16
<i>Imagen 3: Imagen antes y después de la calibración radiométrica</i> .....	16
<i>Imagen 4: (b) Imagen georreferenciada</i> .....	16
<i>Imagen 5: RCS Esfera Ideal, Flat Plate, CR en forma de diedro</i> .....	17
<i>Imagen 6: a) Triedro láminas rectangulares, b) Triedro láminas triangulares, c) Triedro láminas semicirculares</i> .....	19
<i>Imagen 8: Imagen a) longitud de la arista, b) Grosor lámina CR, c) Ángulo de canteo, d) Radio orificio de drenaje</i> .....	21
<i>Imagen 11: Satélite SAR realizando barridos</i> .....	23
<i>Imagen 13: Diseños .CAD importados a POFACETS</i> .....	25
<i>Imagen 14: Obtención del RCS de un diseño complejo importado a POFACETS</i> .....	25
<i>Imagen 15: Pantalla de inicio POFACETS</i> .....	26
<i>Imagen16: Manual Design of Model POFACETS</i> .....	26
<i>Imagen17: Design Model Graphically POFACETS</i> .....	27
<i>Imagen 18: Selección modo de estudio en Mono-estático</i> .....	28
<i>Imagen 19: Imagen a) Parámetros estudio monoestático, b) Parámetros estudio biestático</i> ...	29
<i>Imagen 20: Selección modo de estudio en Biestático</i> .....	29
<i>Imagen 21: Concepto de Radar Cross Section</i> .....	31
<i>Imagen 22: RCS principales figuras a analizar</i> .....	32
<i>Imagen 23: Frecuencias y longitudes de onda utilizadas en diferentes sensores de teledetección</i> .....	32
<i>Imagen 25: Configuración efecto de tierra sobre plano XY</i> .....	34
<i>Imagen 26:a) Triedro de caras rectangulares de 3m de arista interna, b) Triedro de caras triangulares de 3m de arista interna</i> .....	35
<i>Imagen 28: Zoom Simulación RCS de CR con secciones triangulares y rectangulares, modo análisis biestático</i> .....	36
<i>Imagen 30: Imagen a) Sin efecto de tierra, b) Con efecto de tierra en plano XY</i> .....	38
<i>Imagen 31: Simulación del efecto de la tierra en plano XY sobre CR triangulares de 3m de arista</i> .....	39
<i>Imagen 32: Matriz de vértices modo diseño manual</i> .....	41
<i>Imagen 33: CR triangular sencillo</i> .....	41
<i>Imagen 34: Pantalla "UTILITIES", opción importar .stl</i> .....	42
<i>Imagen 35: Modelo importado desde CATIA</i> .....	43
<i>Imagen 36: Tabla de vértices del modelo importado desde POFACETS</i> .....	43
<i>Imagen 37: Simulación RCS longitud Arista monoestático</i> .....	45
<i>Imagen 38: Simulación RCS Grosor perfil Mono-estático</i> .....	46
<i>Imagen 39: CR con orificio circular, sobredimensionado en tamaño pero siguiendo el diseño clásico de orificio de drenaje</i> .....	48
<i>Imagen 40: Simulación RCS Radio orificio drenaje monoestático</i> .....	50
<i>Imagen 41: Ángulo de canteo (45º) sobre diseño real de simulación</i> .....	51
<i>Imagen 42: Simulación RCS Ángulo canteo Mono-estático</i> .....	52
<i>Imagen 43: Simulación RCS longitud Arista</i> .....	53
<i>Imagen 44: Zoom Simulación RCS longitud Arista</i> .....	54
<i>Imagen 45: Simulación RCS grosor CR, arista 3m</i> .....	55
<i>Imagen 46: Zoom Simulación RCS grosor CR, arista 3m</i> .....	56



<i>Imagen 47: Simulación RCS grosor CR, arista 3m .....</i>	<i>57</i>
<i>Imagen 48: Zoom Simulación RCS grosor CR, arista 3m .....</i>	<i>58</i>
<i>Imagen 49: Simulación RCS radio orificio de drenaje a 0.1 .....</i>	<i>59</i>
<i>Imagen 50: Zoom Simulación RCS radio orificio de drenaje a 0.1 .....</i>	<i>60</i>
<i>Imagen 51: Simulación RCS Ángulo de canteo .....</i>	<i>61</i>
<i>Imagen 52: Zoom Simulación RCS Ángulo de canteo .....</i>	<i>62</i>

## INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Criterios de simulación y visualización en POFACETS, modo análisis Biestático. ....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 2: Características de diseño CR triangular con una longitud de arista variable.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 3: RCS Máximos para diferentes valores de arista .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 4: Características de diseño CR triangular con un grosor variable.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 5: RCS Máximos para diferentes valores del grosor del perfil.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 6: Características de diseño CR triangular variando el tamaño del orificio de drenaje ....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 7: RCS Máximos para diferentes valores del grosor del perfil.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 8: Características de diseño CR triangular variando el ángulo de canteo.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 9: RCS del ángulo de canteo <math>\vartheta=54.74^\circ</math> para diferentes ángulos de canteo.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 10: Características de diseño CR triangular, Característica de estudio longitud de Arista</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 11: RCS Máximos para diferentes valores de arista .....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 12: Características de diseño CR triangular, Característica de estudio Grosor lámina CR</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 13: RCS Máximos para diferentes grosores, arista 3m .....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 14: Características de diseño CR triangular variando el grosor y permitiendo una resolución mayor en la estimación de la RCS con el ángulo de elevación.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 15: RCS Máximos para diferentes Grosores. Arista 3m.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 16: Características de diseño CR triangular, Característica de estudio radio orificio de drenaje a 0.1.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 17: RCS Máximos para radios del orificio de drenaje .....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 18: Características de diseño CR triangular, Característica de estudio Ángulo de canteo</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 19: RCS Máximos y segundos picos .....</i>	<i>62</i>

## INDICE ECUACIONES

<i>Ecuación 1: RCS objetivo .....</i>	<i>31</i>
<i>Ecuación 2: RCS(<math>\sigma</math>) de esfera .....</i>	<i>31</i>
<i>Ecuación 3: RCS de CR forma de triedro.....</i>	<i>33</i>
<i>Ecuación 4: Cálculo del peso de un CR arista 3m, espesor láminas 10mm .....</i>	<i>47</i>



## RESUMEN

El Trabajo Fin de Grado se centrará en el diseño y estudio de Corner-Reflectors (CR) de aluminio en forma de triedro para su posterior uso en procesos de calibración y georreferenciación de sistemas SAR (SyntheticAperture Radar). El estudio del diseño se realizará analizando la RCS (Radar Cross Section) producida por los cambios en los parámetros de diseño del CR. Las características de diseño que se estudiarán son la longitud de las aristas, ángulo de canteo de las aristas, radio del orificio de drenaje y el grosor del material de fabricación. Las estimaciones se realizarán tanto en configuración monoestática, transmisor y receptor están situados en el mismo punto, como biestática, transmisor y receptor están en lugares distintos. La estimación del RCS se realizará utilizando el software POFACETS, aplicación desarrollada por la Naval Postgraduate School, que se basa en la aproximación de los objetos a medir mediante unión de triángulos.

## ABSTRACT

This Project describes the activities to be followed in order to design an aluminum trihedral Corner Reflector. The study design will be carried out by analyzing the RCS (Radar Cross Section) produced by changes in the CR parameters (edges length, edges chamfering, drain holes, sheet thickness and the arrangement of the transmitter and receptor used, which are monostatic when transmitter and receptor are located in the same spot or bistatic when transmitter and receptor are located in different spots.

The software to perform the RCS estimation is POFACTES, is a MATLAB application, free and easy to use, it has been developed for the Naval Post Graduate School, the model composition for the analysis will be carry out through triangles unions, which provides a great approximation to the real model and a decrease of the RCS calculations.

## PALABRAS CLAVE

Sección radar (RCS), Corner-reflector (CR), Sistemas radar monoestáticos y biestáticos, Radar de apertura sintética SAR, POFACTS.

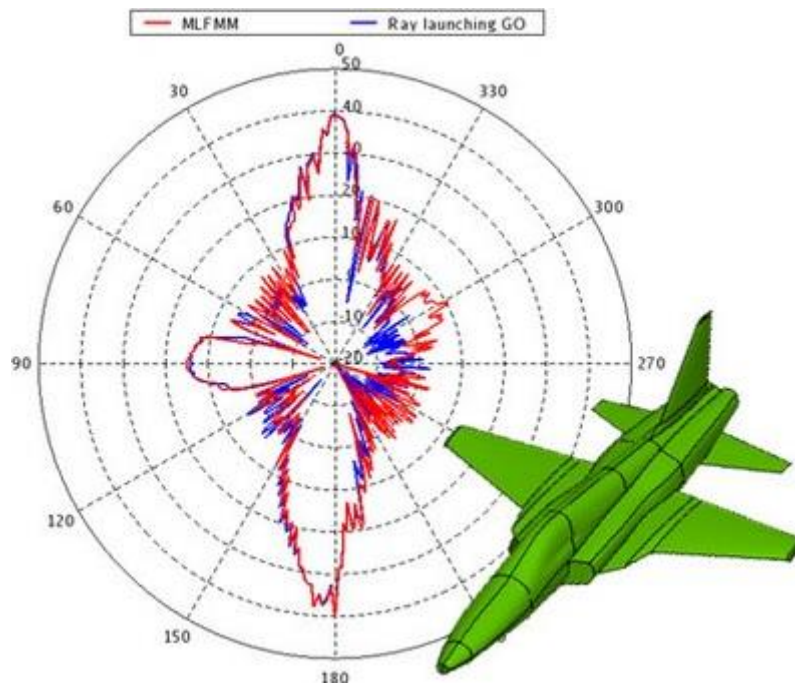
## ACRONIMOS

CR	Corner Reflector
RCS	Radar Cross Section
SAR	Radar de Apertura Sintética (Synthetic Aperture Radar).
TFG	Trabajo Fin de Grado



## RESUMEN EXTENDIDO

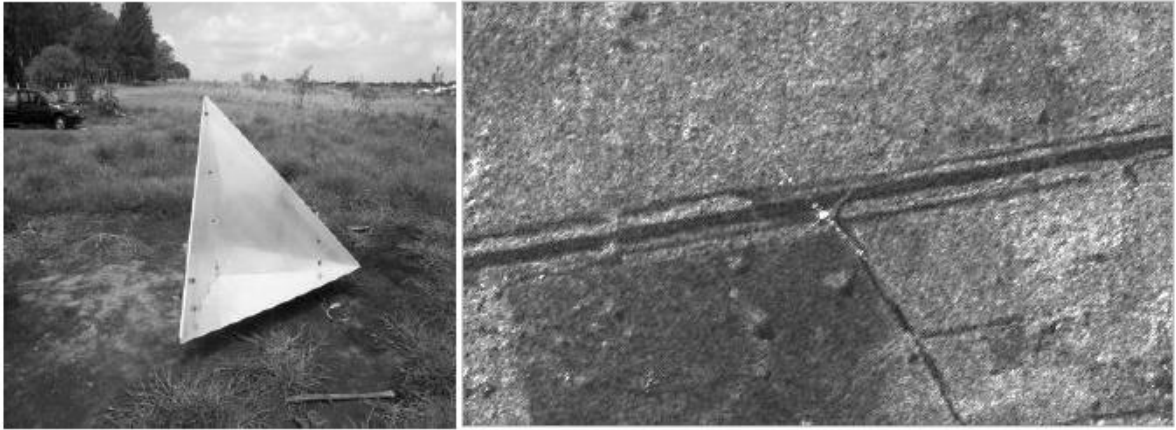
Uno de los principales usos de los CR es para la calibración de sistemas radar en general. Debido a la disposición de las caras que forman el CR, el haz que ilumina el sistema radar es reflejado a un punto en concreto donde se puede medir la densidad de potencia reflejada, nos referimos al RCS (Radar Cross Section) o firma radar, que es una característica de cada objeto principalmente por sus condiciones estructurales (tamaño, forma, propiedades electromagnéticas del material con el que está hecho...) y de las peculiaridades de la onda que incide sobre él (frecuencia, polarización, ángulo de llegada...) que mide la reflectividad de un determinado objeto ante la iluminación por parte de una onda electromagnética.



*Imagen 1: RCS producido por un avión de combate*

Este sistema de calibración es fundamental para sistemas satélites de alta resolución SAR (Synthetic Aperture Radar), utilizados por sus características de cobertura y disponibilidad para realizar labores de control de medio ambiente, meteorología y cartografía entre otros. Los CR se utilizan para el proceso de calibración de la imagen y el proceso de georreferenciación.

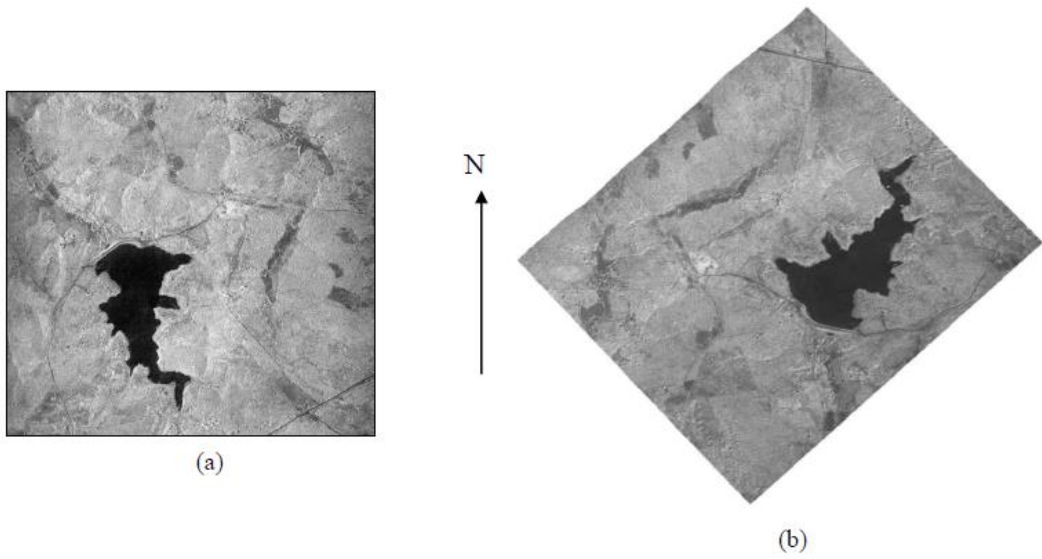




*Imagen 2: CR utilizado como referencia para la calibración de un satélite SAR*



*Imagen 3: Imagen antes y después de la calibración radiométrica*



*Imagen 4: (b) Imagen georeferenciada*

Los principales elementos que intervienen en el diseño de un CR son la geometría de las caras, las dimensiones de las aristas, el ángulo de canteo de las arista, el orificio de drenaje y el grosor del material de fabricación. El valor de RCS del CR también depende de la disposición del transmisor y el receptor utilizados existiendo dos configuraciones: Monoestático si el transmisor y el receptor están situados en el CR o Biestático si transmisor y receptor están separados.

Los CRs convencionales se diseñan en forma de diedro, en forma de triedro (con caras triangulares/rectangulares), “flat plates” o esferas ideales. En la imagen 5 se presentan algunos ejemplos de estos CRs y su comportamiento refractivo.

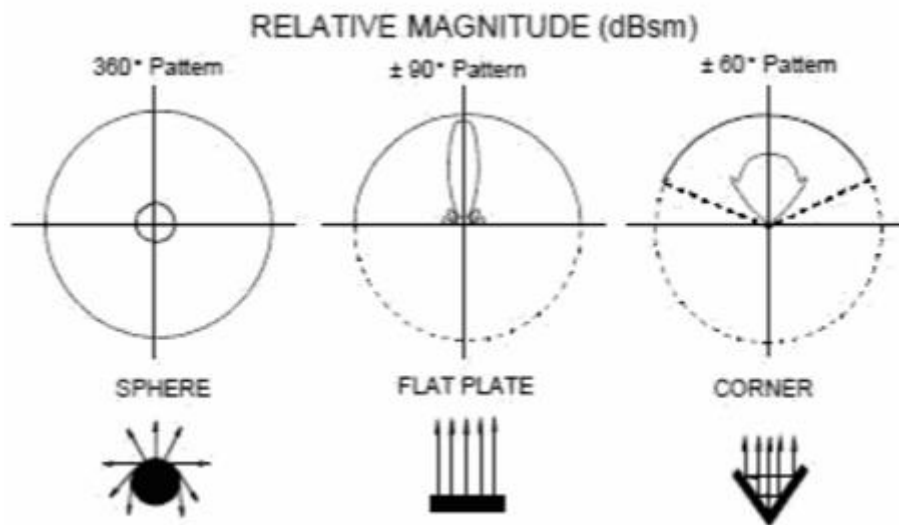


Imagen 5: RCS Esfera Ideal, Flat Plate, CR en forma de diedro

Existen varias herramientas para la estimación del RCS disponibles en el mercado, tales como FASCRO, basada en óptica física, HFSS-IE, basada en el método de los momentos o FEKO, utilizando el Método Rápido de Multinivel de Múltiplo (Multi Level Fast Multipole Method-MLFMM) entre otros. En este TFG se ha utilizado la herramienta POFACETS de uso libre y que proporciona buenas estimaciones basadas en la aproximación a los CRs por medio de triángulos. POFACETS es una aplicación de MATLAB desarrollada por la Naval Post Graduate School.

Los resultados mostrados facilitan el diseño de CRs tanto para configuraciones monoestáticas como biestáticas llegando a las siguientes tendencias: uso de tamaños grandes de aristas y del grosor del material, uso de valores reducidos de ángulo de canteo y orificios de drenaje pequeños que permitan un correcto desagüe de los mismos.



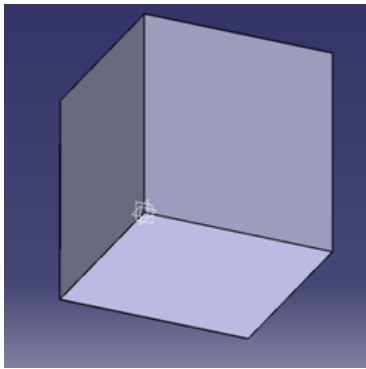
## MEMORIA

### 1 INTRODUCCION

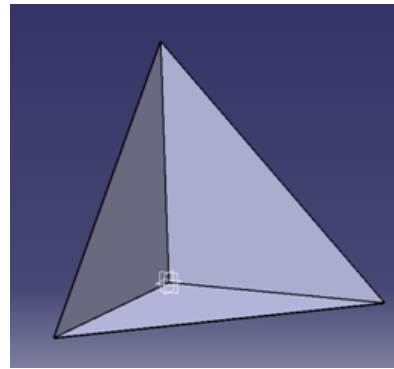
#### 1.1 ¿QUE ES UN CORNER REFLECTOR?

Un Corner Reflector (CR), es un elemento pasivo metálico, el cual al ser iluminado por una onda electromagnética, éste refleja la onda devolviéndola con mayor o menor intensidad en función de su estructura. El parámetro cuantitativo que caracteriza un CR es su RCS (Radar Cross Section) que mide la reflectividad del CR cuando es iluminado por una onda electromagnética.

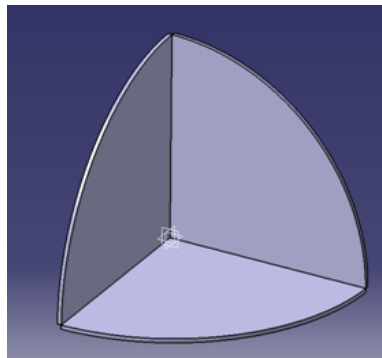
Los CR tienen varias posibilidades de diseño, desde Diedros a triedros con caras rectangulares, triangulares y semiesféricas.



*Imagen a*



*Imagen b*



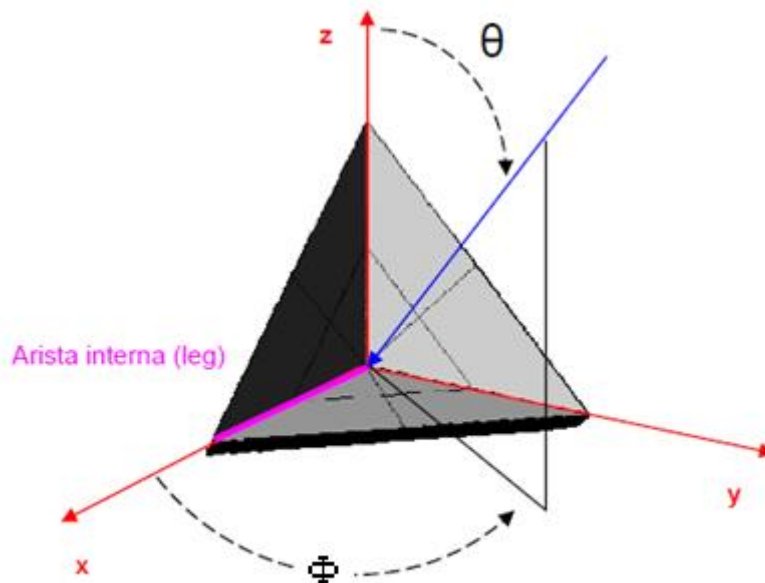
*Imagen c*

*Imagen 6: a) Triedro láminas rectangulares, b) Triedro láminas triangulares, c) Triedro láminas semicirculares*

El tipo de CR determina el número de parámetros libres en el diseño del mismo para obtener la RCS y apuntamiento deseados. El triedro de caras triangulares (Imagen 6 -a) es el más insensible a errores de apuntamiento, característica que se ha comprobado en el apartado 2.1.2 donde se ha utilizado la herramienta Sw POFACETS para estimar la RCS y apuntamiento de triedros de caras triangulares y rectangulares. Además el triedro triangular es el más utilizado en calibración de sistemas SAR, por lo que este TFG se centra en el estudio de esta configuración.

El diseño básico en un triedro CR de caras triangulares depende de los siguientes parámetros indicados en la Imagen 7:

- Ángulo de elevación ( $\theta$ ,  $\theta$ ) como el formado entre el eje  $+z$  y la dirección de incidencia. Ver imagen 7
- Ángulo de Azimuth ( $\phi$ ,  $\Phi$ ) como el formado entre el eje  $+x$  y la proyección de la dirección de incidencia sobre el plano  $XY$ . Ver imagen 7



*Imagen 7: Esquema Corner Reflector. Nótese que las caras visibles (internas) del triedro están en los planos  $XY$ ,  $XZ$  e  $YZ$  respectivamente.*

- Longitud de la Arista ( $l$ ). (referencia a la imagen 8-a)
- Grosor de las láminas del triedro ( $d$ ). (referencia a la imagen 8-b)
- Ángulo de canteo ( $\beta$ ) como el ángulo de corte de cada una de las caras. El canteo se practica para no dejar aristas vivas en el CR que puedan ocasionar daños durante su manipulación. (referencia a la imagen 8-c)
- Radio del orificio de drenaje ( $r$ ) que permitirá evacuar el agua acumulada por la lluvia, condensación, debido a que los emplazamientos de los CR para la calibración de satélites se realizan a cielo abierto, lo cual lo deja a merced de las inclemencias del tiempo. (referencia a la imagen 8-d)

NOTA: Para una mejor visualización se ha eliminado la lámina del plano yz, pudiendo observar las láminas correspondientes a los planos xy (Base del CR) y plano zx (Lámina Izquierda del CR), para el caso del orificio de drenaje se han eliminado del diseño las láminas de los planos yz y xz, quedándonos para la explicación con la base del CR, lámina en plano xy.

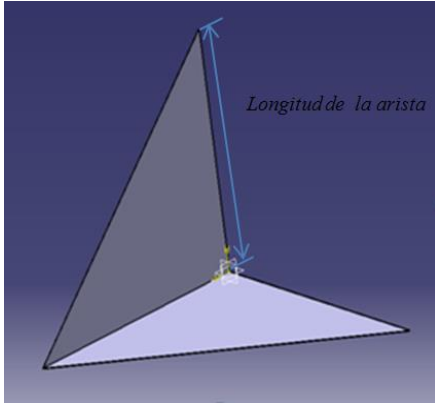


Imagen a

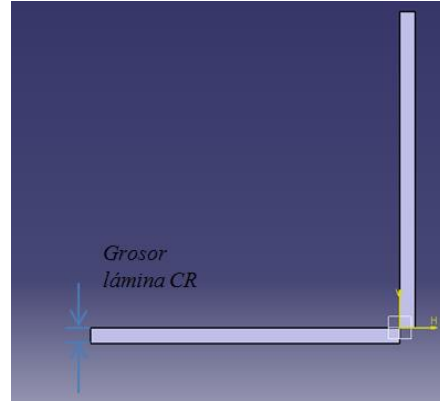


Imagen b

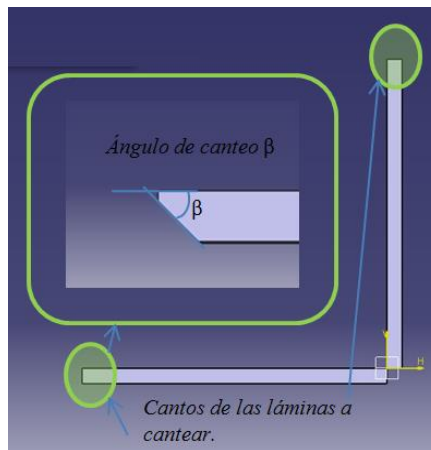


Imagen c

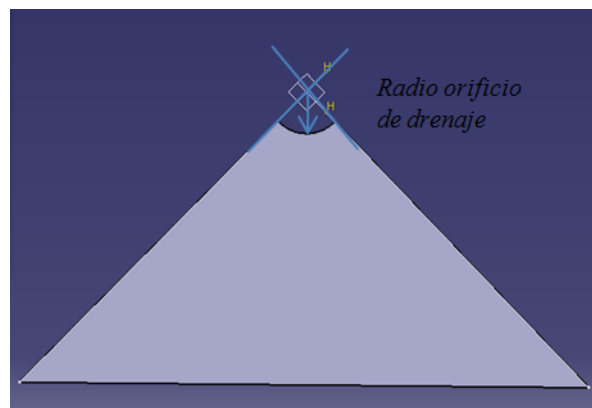


Imagen d

Imagen 8: Imagen a) longitud de la arista, b) Grosor lámina CR, c) Ángulo de canteo, d) Radio orificio de drenaje.

NOTA: En la imagen 8-b y 8-c la superficie reflectora se da en la cara interior de las láminas.

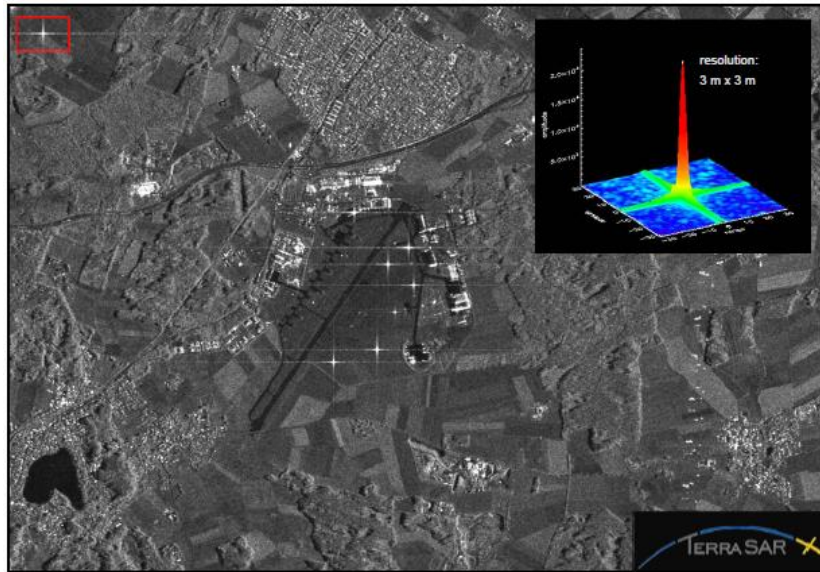
## 1.2 IMPORTANCIA DE LOS CORNER REFLECTORS

Uno de los usos básicos de los CRs se hace presente en la calibración de sistemas Radar. Su principal ventaja con respecto a otros sistemas de calibración es que los CRs son elementos pasivos y de simple construcción lo que presupone un coste más bajo y un mantenimiento más fácil que por ejemplo un sistema basado en transmisores. Otra característica es que ofrecen un considerable RCS con un tamaño reducido de CR. Todo esto queda patente en la utilización de CRs en sistemas SAR (Synthetic Aperture Radar), tanto para el proceso de calibración de la imagen, como para el proceso de georreferenciación.

En la imagen 9, se muestra la campaña de instalación de los CRs, que consiste en la colocación de los mismos en puntos estratégicos de los que se conoce las coordenadas geográficas y la altitud con exactitud, así como la distancia entre los CRs. Durante la iluminación del sistema SAR, los CRs reflejarán una alta cantidad de energía de manera que serán fácilmente identificables en las imágenes SAR, permitiendo la calibración y georreferenciación de la misma. Los puntos centelleantes de la imagen 10 son los reflejos asociados a los CRs iluminados por la señal emitida desde el satélite. El objetivo de este TFG será optimizar el diseño de los CRs para obtener una máxima RCS que facilite la identificación de los CRs en las imágenes SAR.



*Imagen 9: Instalación de varios CR*

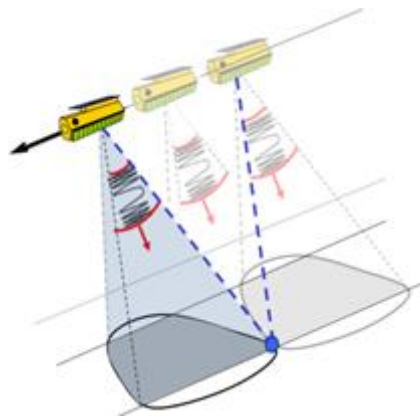


*Imagen 10: Imagen de CRs desde un Satélite SAR*

### 1.3 APLICACIONES CRs. SATELITES OBSERVACION TIERRA

Los satélites de observación terrestre son de vital importancia en los últimos tiempos, ya que son utilizados en labores de control de medio ambiente, meteorología y cartografía, entre otras utilidades.

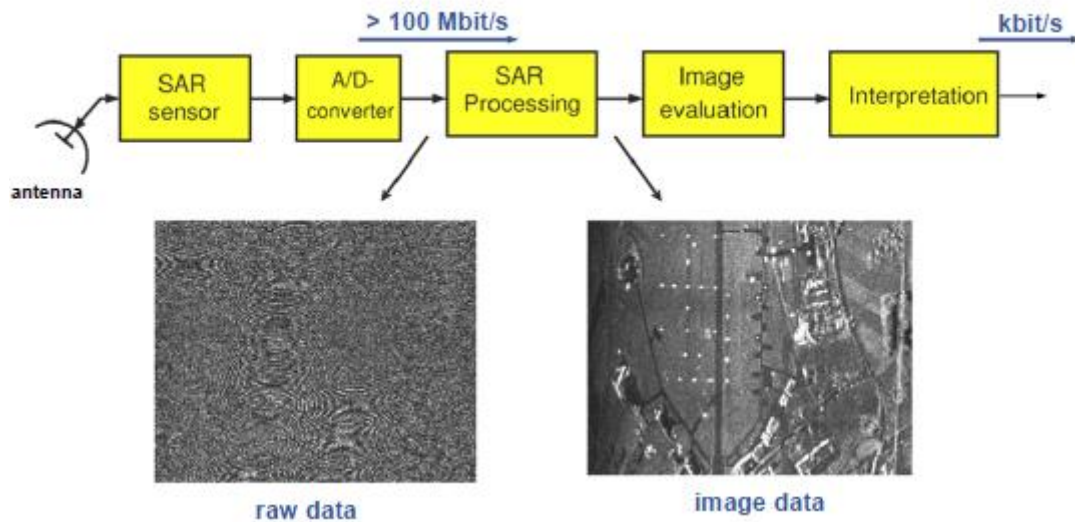
Los satélites de observación terrestre usan Radares de Apertura Sintética (SAR) que combinan la información obtenida tras realizar varios barridos por la antena, recreando un barrido virtual que permite adquirir datos con una mayor resolución (Referencia a la imagen 11).



*Imagen 11: Satélite SAR realizando barridos*

Al final, se obtendría el mismo rendimiento que se obtendría con una antena mucho más grande y directiva que la que dispone en realidad. Lo que significa que los satélites pueden utilizar antenas de menor tamaño y peso, estas características de diseño son cruciales en el ámbito aeroespacial, ya que cada gramo y centímetro embarcado en un satélite suponen un alto coste.





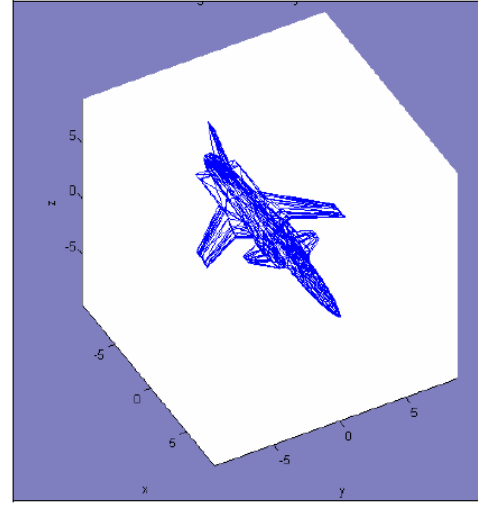
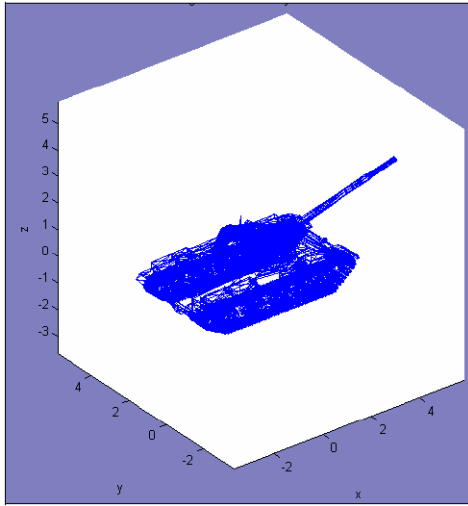
*Imagen 12: Flujo de Datos SAR*

En la Imagen 12, se presenta un esquema que resume los pasos por los que pasan los datos obtenidos por la antena SAR para formar una imagen y permitir su posterior interpretación.

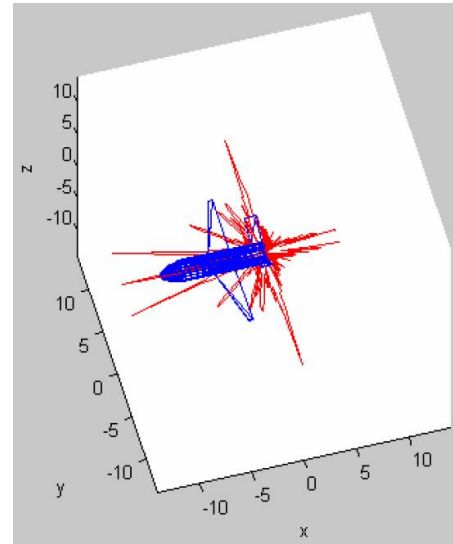
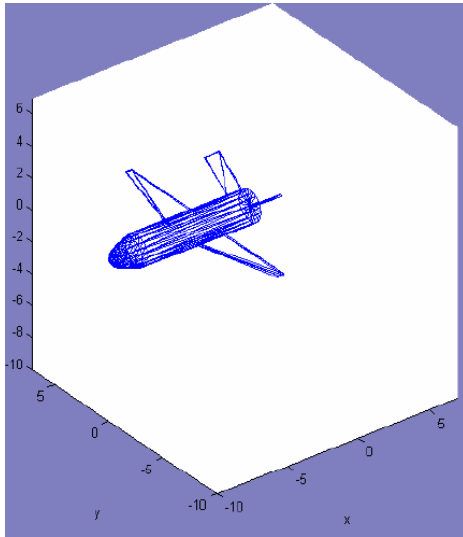
#### 1.4 POFACETS

Existen varias herramientas para la estimación del RCS disponibles en el mercado, tales como FASCRO, basada en óptica física, HFSS-IE, basada en el método de los momentos o FEKO, utilizando el Método Rápido de Multinivel de Múltiplo (Multi Level Fast Multipole Method-MLFMM) entre otros. Todas estas herramientas son utilizadas en grandes empresas o institutos de investigación, pero resultan inaccesibles para el usuario medio debido al precio de las licencias de uso. Por éste motivo se ha optado por la utilización de POFACETS, una aplicación de MATLAB de carácter libre, desarrollada por la Naval Post Graduate School. POFACETS ofrece un entorno de simulación intuitivo y fácil de utilizar que además no requiere de un ordenador potente para la realización de cálculos y, como en otras herramientas de cálculo, es posible importar/exportar diseños .CAD haciendo sencillo el cálculo de RCS para diseños complejos.

En las imágenes 13 y 14 se puede ver varios diseños importados y la representación del RCS en uno de ellos.



*Imagen 13: Diseños .CAD importados a POFACETS*



*Imagen 14: Obtención del RCS de un diseño complejo importado a POFACETS*

En la imagen 15, se muestra la pantalla de inicio de POFACETS en la que aparecen las siguientes funciones:

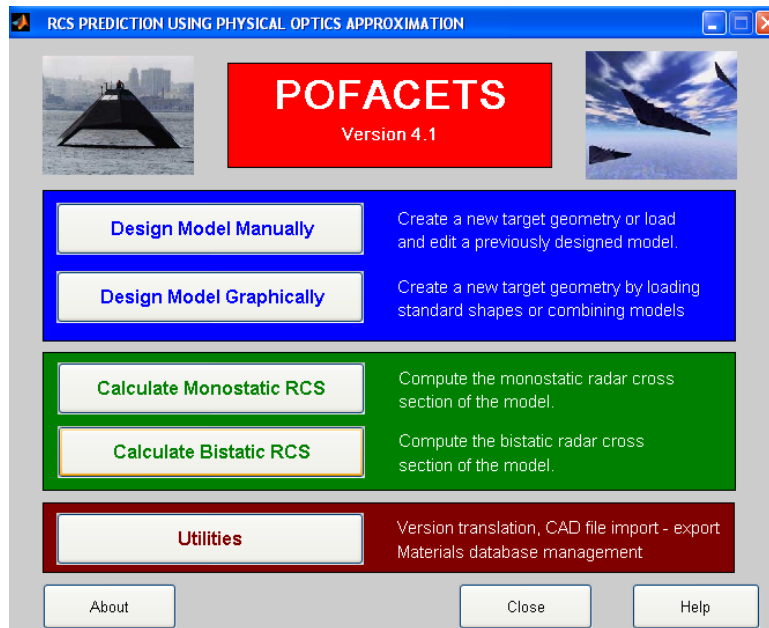


Imagen 15: Pantalla de inicio POFACETS

- **Design Model Manually.** Esta opción permite hacer uso del editor de modelos del propio POFACETS, permite la creación de modelos sencillos de forma manual. Esta forma de trabajar tiene sus limitaciones ya que tiene un número máximo de vértices y caras que puede almacenar por diseño (Referencia a la imagen 16).

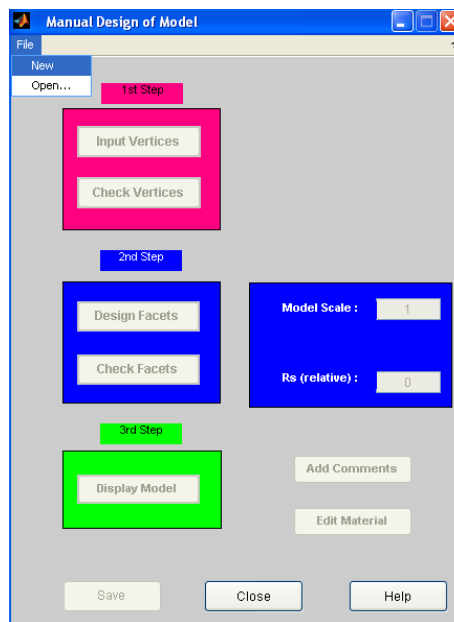
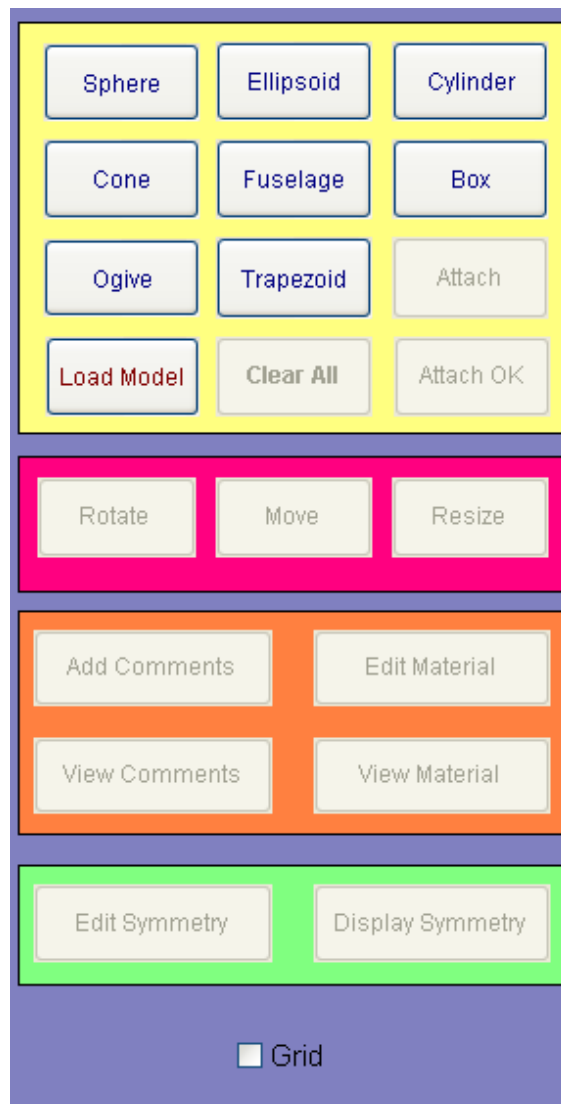


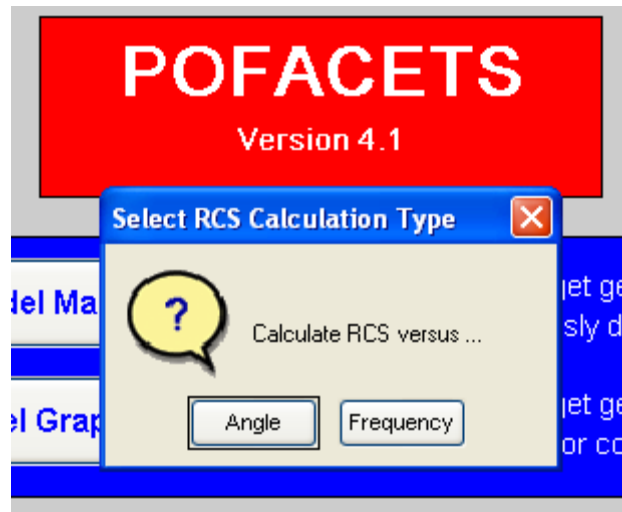
Imagen 16: Manual Design of Model POFACETS

- **Design Model Graphically.** Esta opción permite realizar de forma rápida importaciones de otros modelos, además de la simulación de figuras ya prediseñadas por POFACETS. Esta opción se utilizará para editar el tipo de material (Referencia a la imagen 17).



*Imagen17: Design Model Graphically POFACETS*

- **Calculate Monostatic RCS.** Esta opción permite realizar el cálculo monoestático del RCS, en el que se considera que el receptor y el emisor se encuentran en el mismo dispositivo. Al seleccionar este modo de cálculo la primera opción que te da a elegir es si quieres realizar el análisis estudiando los ángulos o la frecuencia (Referencia a la imagen 18).



*Imagen 18: Selección modo de estudio en Mono-estático*

Los sistemas SAR trabajan a una frecuencia fija conocida, siendo el único elemento variable el ángulo con el que el satélite ilumina el CR, por lo que la pantalla de frecuencia no se analizará, ya que el objetivo de este TFG no es realizar un manual de uso de programa POFACETS, simplemente se describirán aquellas opciones del mismo que serán utilizadas en los análisis para la obtención de resultados del RCS.

Una vez elegida la opción de ángulo se abre una nueva pantalla presentada en la imagen 19-a con las siguientes opciones:

- Load file. Importa un modelo de un archivo con extensión .mat.
- Ground Plane. Opción de seleccionar si en el estudio va a afectar el suelo y si es así que permitividad va a tener o si será un conductor perfecto.
- Surface Roughness. Define la Rugosidad de la superficie.
- Ángulo de cálculo. Donde se indica los ángulos de inicio y fin para los que se va a estimar la RCS así como los pasos incrementales.
- Series de Taylor involucradas en los cálculos. Estas series de Taylor realizan el sumatorio del RCS proyectado por las reflexiones de los múltiples triángulos que conforman los modelos a estudio.
- Polarización utilizada. Como nuestro ángulo de estudio será  $\theta^\circ$ , la polarización a utilizar será TM.
- Frecuencia de trabajo.
- Modos de visualización de los resultados: en 3D o coordenadas polares.

## INTRODUCCION

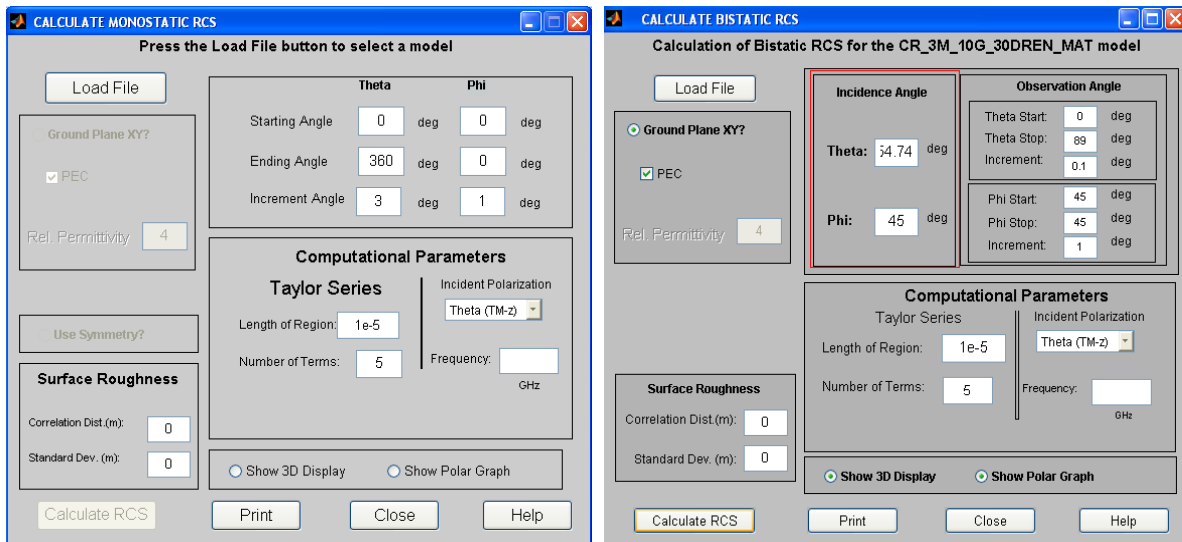


Imagen a

Imagen b

Imagen 19: Imagen a) Parámetros estudio monoestático, b) Parámetros estudio biestático

- **Calculate Bistatics RCS.** Esta opción permite realizar el cálculo biestático de la RCS (Referencia imagen 19-b), en éste modo de análisis el receptor y el emisor se encuentran en diferentes posiciones el uno del otro. Al seleccionar éste modo de cálculo, la primera opción que te da a elegir, es si quieres realizar el análisis estudiando los ángulos o la frecuencia (Referencia a la imagen 20).

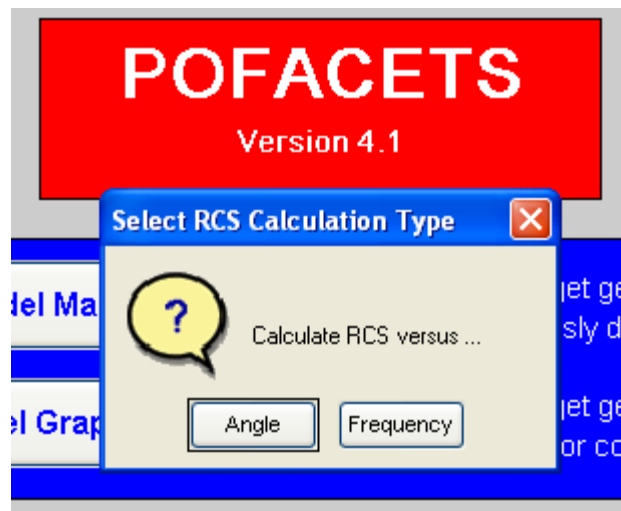


Imagen 20: Selección modo de estudio en Biestático

Al igual que en el caso monoestático únicamente se contemplarán las estimaciones de RCS en función del ángulo de elevación manteniendo fija la frecuencia de trabajo.

Las opciones para realizar la estimación de la RCS biestática, presentadas en la imagen 19-b, son las mismas que en la monoestática, salvo que en biestático eliges el ángulo de incidencia que es distinto al de observación.



## 2 BASE TEORICA

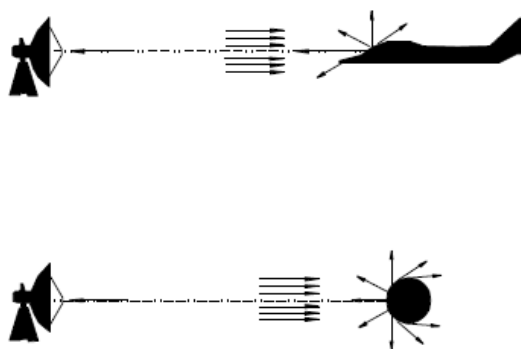
### 2.1 RADAR CROSS SECTION (RCS)

La Radar Cross Section monoestática, es una característica propia del CR que cuantifica la señal reflejada por el mismo en la dirección de la señal emitida por el radar. La RCS de un objetivo puede verse, como la comparación de la intensidad de la señal reflejada por el objetivo comparada con la señal reflejada por una esfera perfectamente pulida de  $1\text{m}^2$  de área de sección transversal (referencia la figura 21).

$$\sigma_{\text{objetivo}} = \frac{\sigma_{\text{Intensidad reflejada del objetivo}}}{\sigma_{\text{esfera}}}$$

$$RCS_{\text{objetivo}} = 10 \log \sigma_{\text{objetivo}} \text{ (dBms)}$$

*Ecuación 1: RCS<sub>objetivo</sub>*



*Imagen 21: Concepto de Radar Cross Section*

La RCS de la esfera dispersa la energía incidente por igual en todas las direcciones. Como se puede ver en la Ecuación 2, la RCS de la esfera no depende de la frecuencia.

$$\sigma_{\text{esfera}} = \pi r^2$$

*Ecuación 2: RCS( $\sigma$ ) de esfera*

Según lo descrito, cada CR radiará un RCS diferente, pudiendo ver en la siguiente tabla las fórmulas para calcular la RCS de las principales figuras a analizar en este TFG:



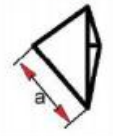


Target		Peak RCS
	Triangular Trihedral	$\sigma = \frac{4\pi a^4}{3\lambda^2}$
	Square Trihedral	$\sigma = \frac{12\pi a^4}{\lambda^2}$
	Circular Trihedral	$\sigma = \frac{0.507\pi^3 a^4}{\lambda^2}$

Imagen 22: RCS principales figuras a analizar

Estos valores pico de RCS, sí que dependen de la frecuencia de trabajo. Como este TFG se basará en los CRs utilizados en las calibraciones de satélites SAR, la banda de frecuencias en las que nos moveremos será entre los 8.2 y 12.4 GHz, que corresponde con la Banda-X (referencia imagen 23).

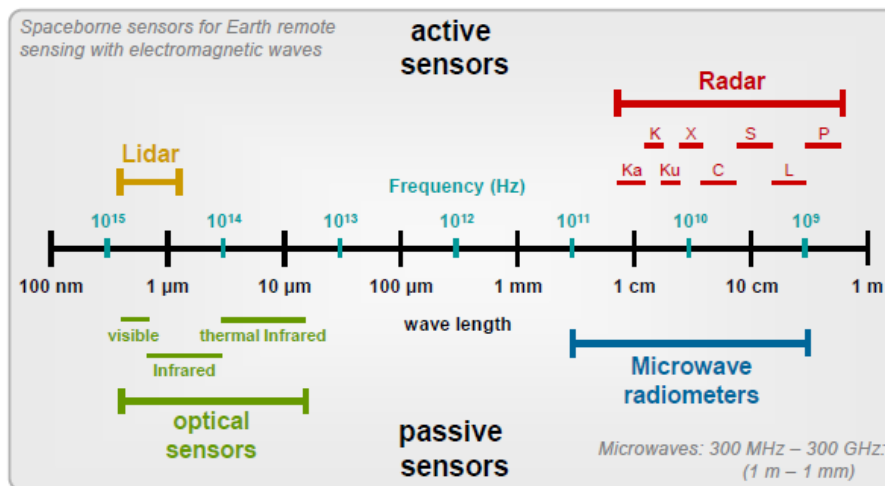


Imagen 23: Frecuencias y longitudes de onda utilizadas en diferentes sensores de teledetección

Los valores de RCS interesan que sean lo mayores posibles, para que sean visibles desde los satélites de calibración, caso totalmente contrario al del sector armamentístico, cuyo interés es el de reducir al máximo el RCS para evitar la detección radar.

## 2.2 ELECCION DE DIMENSIONES, SECCION DEL CR Y MATERIAL DE CONSTRUCCION.

Este TFG, se basa en los CRs para la calibración de satélites SAR que trabajan en banda X, tales como TerraSAR-X o satélite PAZ. Según el documento “*TerraSAR-X Calibration Ground Equipment*” estos satélites operan a la frecuencia central de 9.65 GHz, con un ancho de banda de 300MHz, para calibraciones realizadas en satélites PAZ, se utilizaron triedros metálicos de caras triangulares de longitud de arista interna ( $l$ ) de 1.5m y 3m. Esto, de acuerdo a la ecuación 3, supone valores de RCS máximos de 43.4 dBsm y 55.5 dBsm.

Utilizando como referencia estas longitudes, las longitudes de arista interna analizadas en este TFG variarán desde 1m hasta los 3m, en intervalos de 1/2m.

$$\sigma = \frac{4\pi l^4}{3\lambda^2} (m^2)$$

$$RCS = 10 \log \sigma (dBsm)$$

*Ecuación 3: RCS de CR forma de triedro*

Siendo  $l$  (m) la longitud de la arista interna del CR y  $\lambda$ (m) la longitud de onda. Se obtienen los siguientes valores de RCS:

- $RCS = 43.4dBsm$ , para una arista de  $l=1.5m$
- $RCS = 55.5dBsm$ , para una arista de  $l=3m$

**Con estos valores, se han realizado simulaciones con POFACETS de CRs con perfiles rectangulares y triangulares. Considerando el valor máximo de RCS, el valor de arista utilizado es el de 3m y el espesor de 3mm. El material de construcción es de aluminio 7075, densidad 2810 kg/m<sup>3</sup>, con permitividad de 3.7 y una tangente de pérdidas de 0.0045.**

Como se puede ver en la imagen 24 los valores relativos al material se introducen en POFACETS en la opción Design Model Graphycally, donde una vez importado el modelo a estudio, se edita el mismo, donde se incluye el material a nuestro modelo.

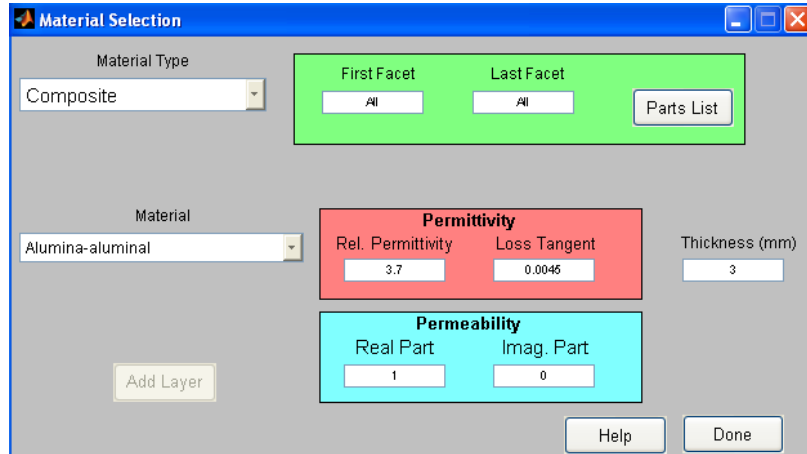


Imagen 24: Introducción de valores del material en POFACTS.

Según diferentes bibliografías como el documento “ *Optimum Corner Reflectors for Calibration of Imaging Radars*”, el máximo RCS se encuentra en los ángulos elevación,  $\theta=54.74^\circ$  y Azimuth,  $\Phi=45^\circ$ , por ello estos ángulos serán los ángulos de estudio del TFG tanto para el caso monoestático, como para el biestático.

El Azimuth permanecerá constante a  $45^\circ$  y nos fijaremos en la variación de la elevación, prestando especial atención a  $54.74^\circ$  donde se confirma que existe un máximo en el valor estimado de RCS.

Se tendrá en cuenta el efecto de la tierra sobre el plano XY, ya que en la vida útil de los CR ésta será su ubicación habitual.

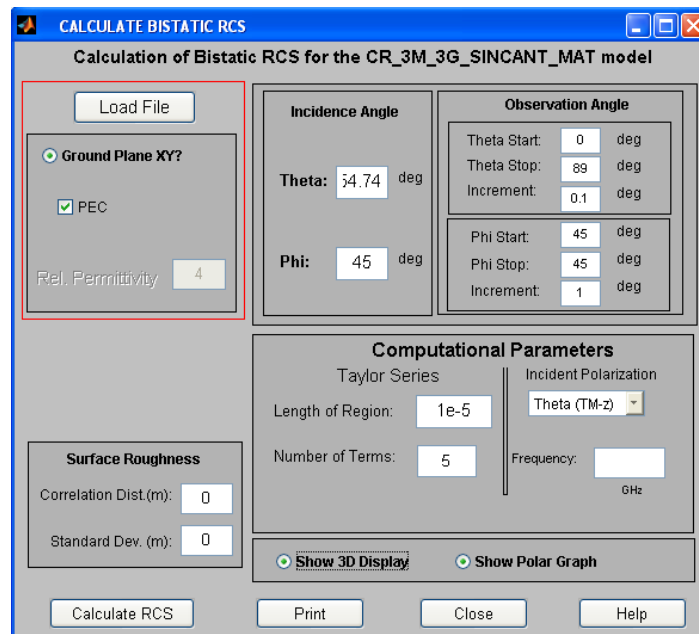


Imagen 25: Configuración efecto de tierra sobre plano XY.

Quedando los criterios de simulación y visualización en POFACETS como se muestra en la tabla.

Modo Análisis	Biestático
Arista l(m)	3
Grosor(mm)	3
Angulo Incidente	
theta $\theta^\circ$	54,74
phi $\Phi^\circ$	45
Ángulo observación	
theta $\theta^\circ$	00:0,1:90
phi $\Phi^\circ$	45
Frecuencia (GHz)	10
Material	
permitividad	3,7
Tangente perdidas	0,0045
Efecto tierra plano XY	SI

Tabla 1: Criterios de simulación y visualización en POFACETS, modo análisis Biestático.

A continuación se ve los modelos de los triedros y los resultados de esta primera simulación.

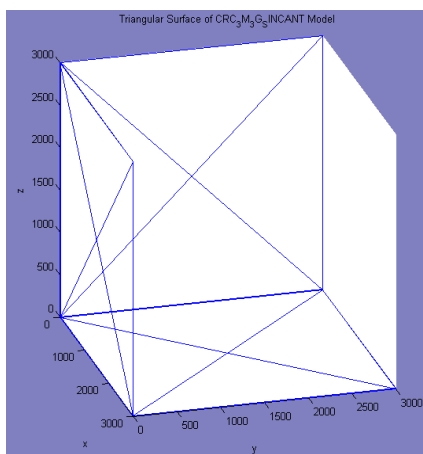


Imagen a

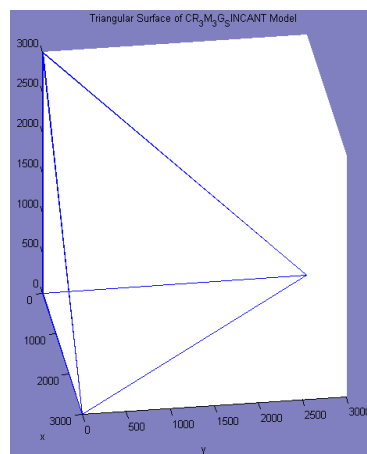


Imagen b

Imagen 26: a) Triedro de caras rectangulares de 3m de arista interna, b) Triedro de caras triangulares de 3m de arista interna.

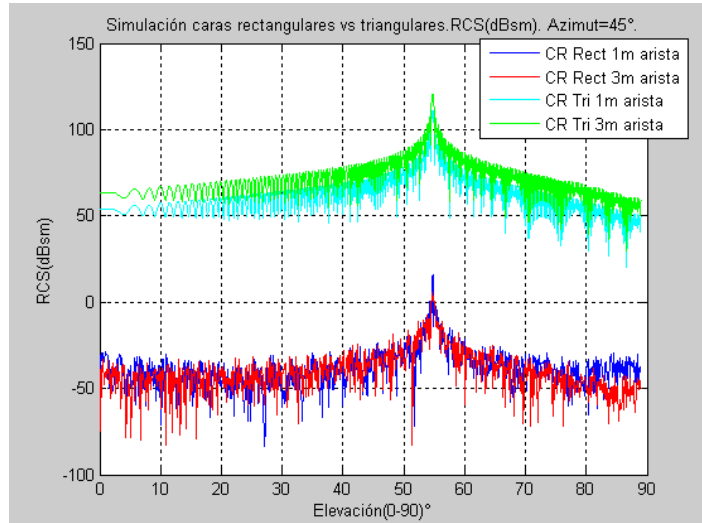


Imagen 27: Simulación RCS de CR con secciones triangulares y rectangulares, modo análisis biestático.

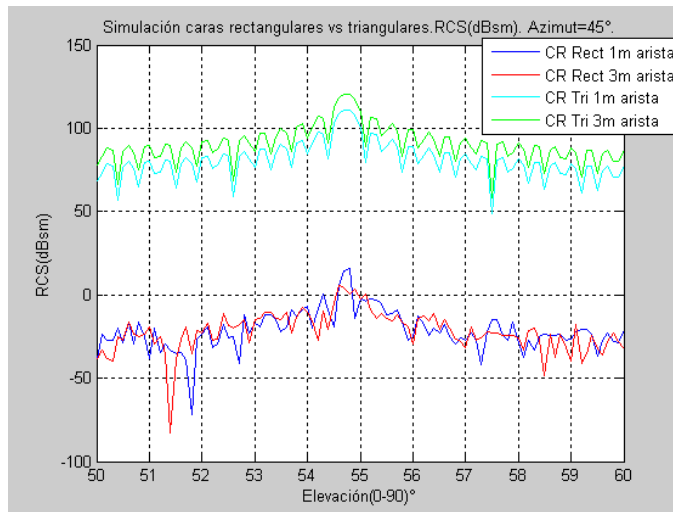
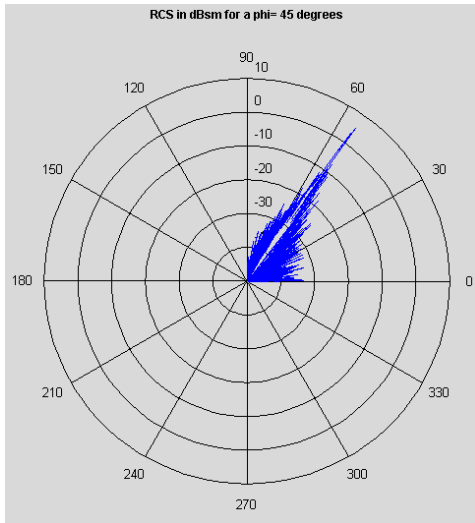
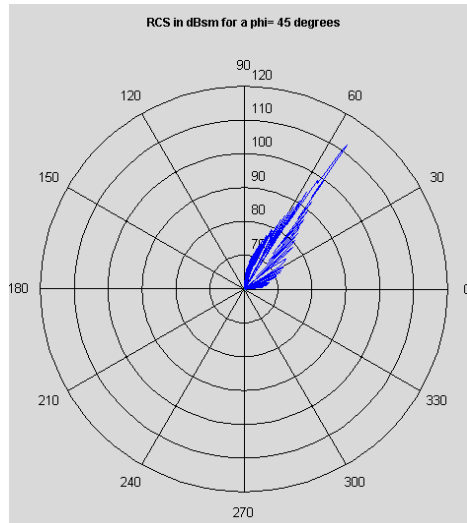


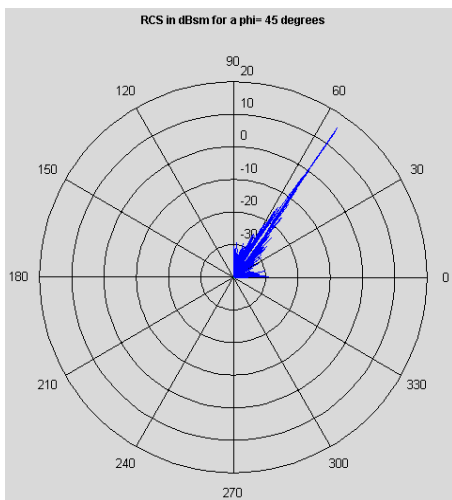
Imagen 28: Zoom Simulación RCS de CR con secciones triangulares y rectangulares, modo análisis biestático.



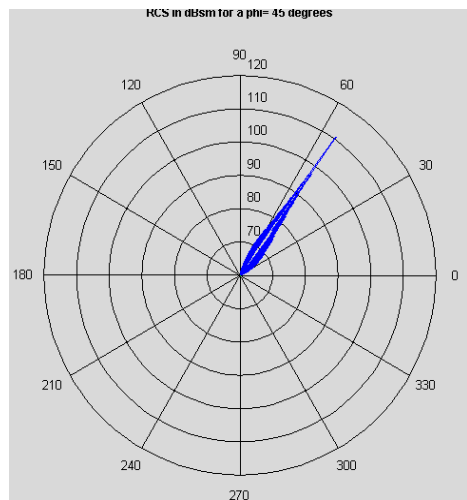
*Imagen a*



*Imagen b*



*Imagen c*



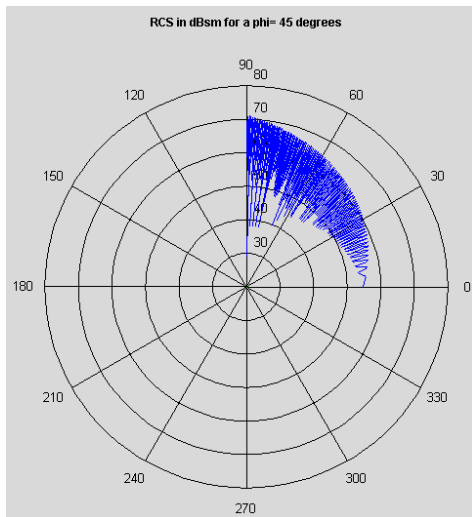
*Imagen d*

*Imagen 29: Polar RCS de CR a) Rectangular 3m, b) Triangular 3m, c)Rectangular 1m, d)Triangular 1m*

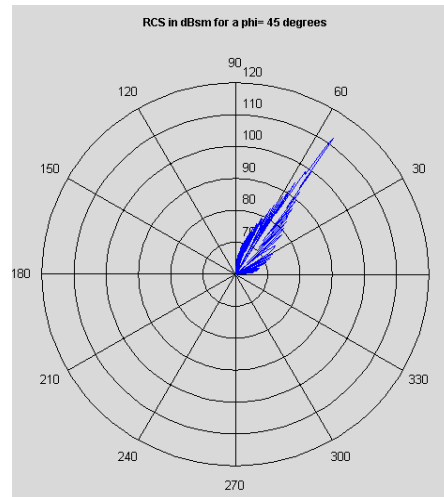
Como se puede apreciar en las representaciones polares de las diferentes simulaciones realizadas (Referencia imagen 29), el CR de sección triangular ofrece un mayor apuntamiento que el de la sección rectangular, además el CR triangular ofrece un mayor RCS valor pico. Por éste motivo y por que la configuración de caras triangulares es la utilizada en calibración de Satélites PAZ, la sección utilizada en este TFG es la triangular, sobre ésta sección se realizarán modificaciones en el diseño como cambio del tamaño de la arista, canteo de los bordes del CR, implementación de varios orificios de drenaje.

El resultado de utilizar el efecto de la tierra en el plano XY, es que la RCS se ve aumentada práctica mente el doble para el ángulo de elevación  $\theta=54.74^\circ$ , debido a las reflexiones de la tierra.(Referencia imagen 30 e imagen 31)

Los criterios de diseño y simulación son los mismos que en la tabla 1.

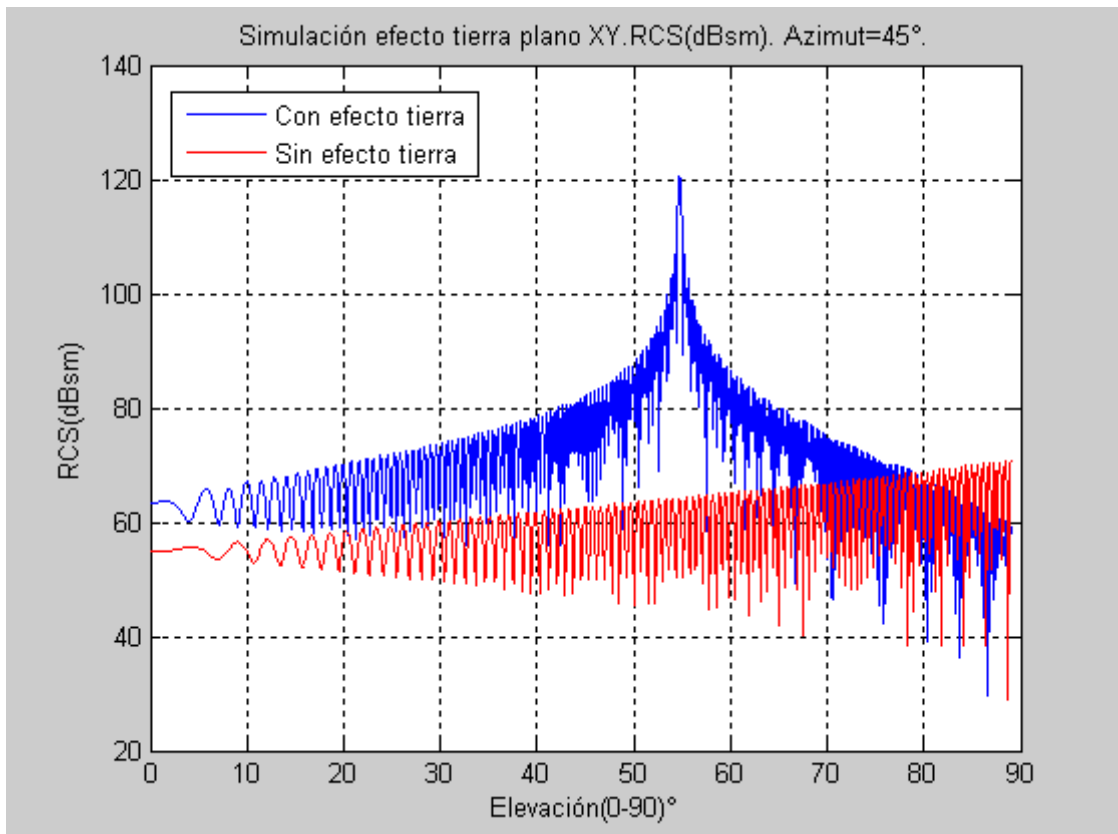


*Imagen a*



*Imagen b*

*Imagen 30: Imagen a) Sin efecto de tierra, b) Con efecto de tierra en plano XY.*



*Imagen 31: Simulación del efecto de la tierra en plano XY sobre CR triangulares de 3m de arista*

### 2.3 MONOESTATICO VS BIESTATICO

La gran mayoría de los sistemas radar existentes tienen una configuración monoestática, en la que el transmisor y receptor se encuentran en la misma posición y por ese motivo la medida de la RCS monoestática ha sido la más utilizada y estudiada. Al ser la más utilizada también se ha potenciado los sistemas de detección de blancos basándose en su RCS monoestática. Teniendo en cuenta los objetivos militares y los desarrollos existentes sobre nuevos sistemas de defensa con respecto a la RCS monoestática de los blancos que revelan la vulnerabilidad de los mismos, resulta de gran interés el estudio de nuevos escenarios radar biestáticos, en los cuales la RCS varía teniendo en cuenta la nueva geometría del sistema y los mecanismos de la dispersión biestática.

En este TFG se aporta, aparte de un estudio de la RCS monoestática de CRs a modo de resultados de referencia, resultados de la dependencia de la RCS biestática de los CRs con respecto a los parámetros de diseño de los mismos. Por lo tanto, las simulaciones



realizadas consideran ambos modos de diseño, pudiendo ofrecer una mayor perspectiva sobre el CR para su uso en posibles sistemas de calibración.

### 3 BASE EXPERIMENTAL

#### 3.1 DISEÑO DE LOS CRs

En una primera etapa se han diseñado los modelos necesarios para las estimaciones de RCS y apuntamiento con el editor de figuras del propio POFACETS realizando diseños sencillos por medio de vértices referenciados en una matriz (referencia imagen 32). A continuación se especifica el material (en la pestaña “Edit Material” presente en la imagen 33).

	1	2	3
1	10	10	0
2	0	10	0
3	0	0	0
4	10	0	0

Imagen 32: Matriz de vértices modo diseño manual

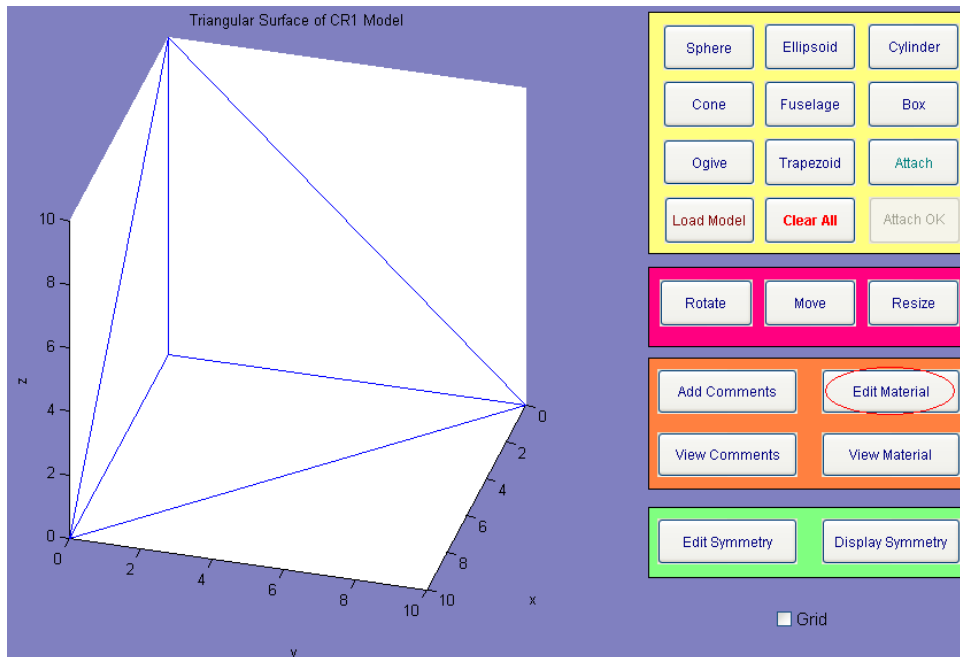


Imagen 33: CR triangular sencillo

Éste modo de diseño es tedioso y resulta poco práctico a la hora de implementar las modificaciones en el diseño que se estudiarán en este TFG. Se necesita de una herramienta de diseño más potente y funcional para realizar todos los modelos a analizar. El software de diseño elegido es CATIA que, además, ofrece guardar los archivos .CATmat como .stl formato legible por POFACETS (utilizando la opción “UTILITIES” de la pantalla principal de POFACETS). Una vez importado el archivo .stl (ver imagen 34) desde CATIA, se guarda como .mat formato con el que POFACETS realiza los cálculos.

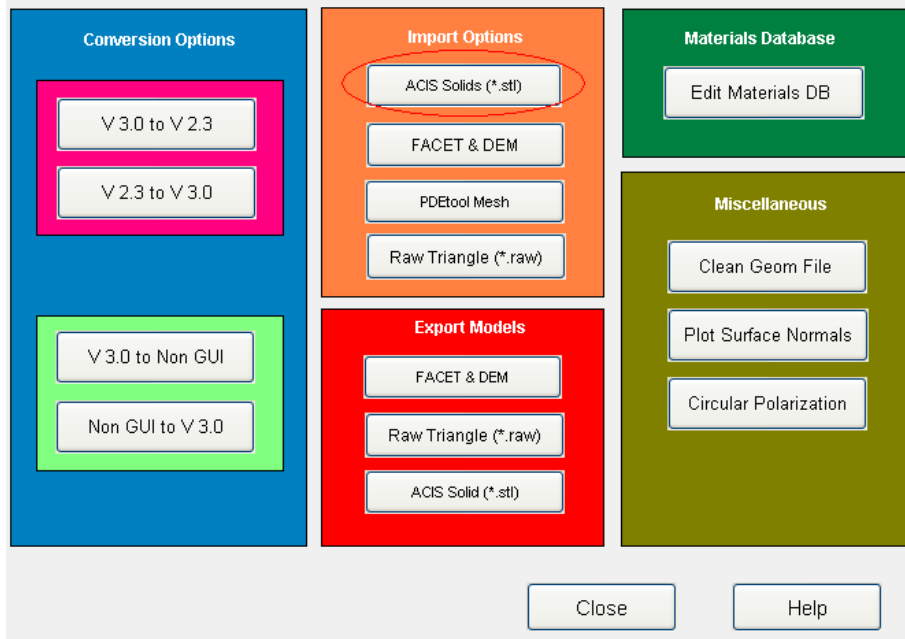


Imagen 34: Pantalla “UTILITIES”, opción importar .stl

En la imagen 32 e imagen 33 se ve la tabla de vectores de un CR simple, sin espesor en las láminas, sin orificio de drenaje, compuesto por 3 triángulos sencillos, éste modelo ha sido creado con el editor de POFACETS. Para dibujar un triángulo hay que rellenar la tabla con los valores de cada vértice. Para modelos más complejos habría que rellenar la correspondiente tabla de vértices, con la complejidad que ello conlleva, ya que debes tener claro la posición de cada uno de los triángulos y sus vértices.

Con otros sistemas de diseño, la metodología es justamente al revés, se dibuja el modelo y luego se implementa automáticamente su tabla de vectores.

A continuación se mostrará un modelo generado en CATIA e importado a POFACETS. Éste modelo es de un triedro de caras triangulares con orificio de drenaje, espesor de láminas y canteo. Como se aprecia, hay un aumento significativo en el número de triángulos (imagen 35) y por consiguiente también del número de vectores (imagen 36).

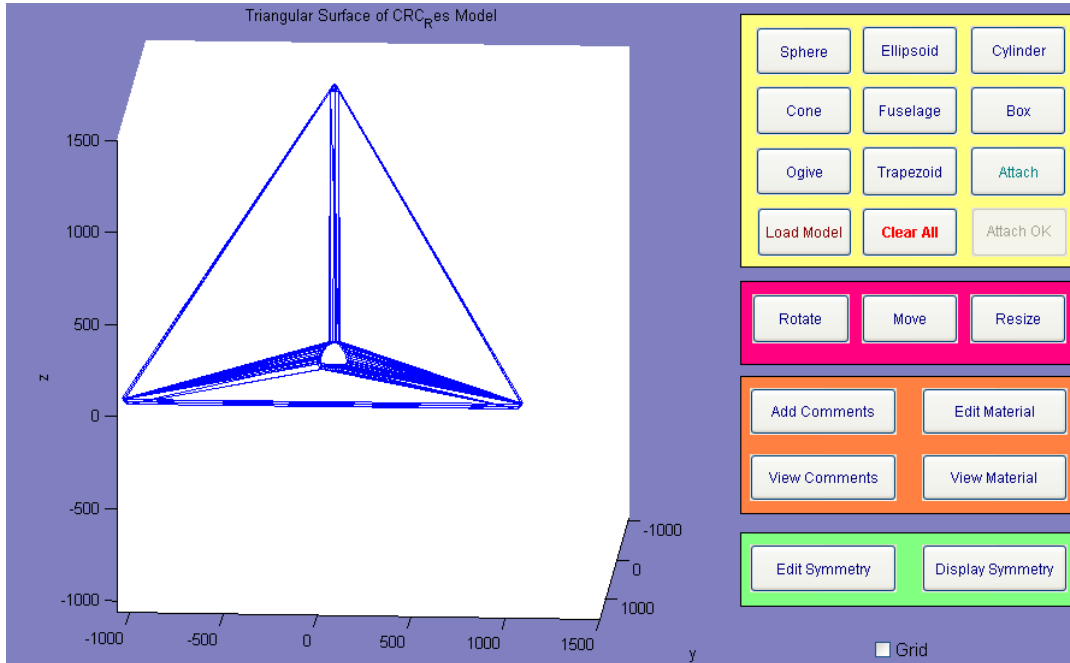


Imagen 35: Modelo importado desde CATIA

Array Editor - coord				
	1	2	3	4
1	99.955	-3	0	
2	100	0	0	
3	100	4.4409e-016	-3	
4	100	4.4409e-016	-3	
5	100	0	0	
6	99.271	12.054	-3	
7	99.271	12.054	-3	
8	100	0	0	
9	99.271	12.054	0	
10	99.271	12.054	-3	
11	99.271	12.054	0	
12	97.094	23.932	-3	
237	1000	4.4409e-016	-3	
238	1000	4.4409e-016	-3	
239	0	1000	1.1369e-013	
240	1000	0	0	
241	1000	0	0	
242	1000	-3	-1.1369e-...	
243	1000	4.4409e-016	-3	
244	0	1.1369e-013	1000	
245	4.4409e-016	-3	1000	
246	1000	0	0	
247	1000	0	0	
248	4.4409e-016	-3	1000	
249	1000	-3	-1.1369e-...	
250	0	1.1369e-013	1000	
251	-3	1.1369e-013	1000	
252	4.4409e-016	-3	1000	
253				

Imagen 36: Tabla de vértices del modelo importado desde POFACETS

### 3.2 MEDIDAS

El objetivo es el estudio de la dependencia de la RCS y el apuntamiento de un CR del tipo triedro triangular ante variaciones del largo de la arista, grosor de las láminas, radio

del orificio de drenaje y ángulo de canteo de borde de la lámina. Estas medidas se realizarán tanto en monoestático como para biestático.

### 3.2.1 ESTIMACIONES DE RCS MONOESTÁTICA

#### 3.2.1.1 DEPENDENCIA CON EL LARGO DE LAS ARISTAS

Se realizará un análisis con diferentes longitudes de arista, sin orificio de drenaje, sin ángulo de canteo y manteniendo un espesor constante, de ésta forma podremos ver que longitud es la más apropiada para una frecuencia de trabajo de 10GHz, frecuencia utilizada como referencia, como se explica en el punto 2.1 donde expone que la banda de frecuencias en las que nos moveremos será entre los 8.2 y 12.4 GHz, correspondiente con la Banda-X, banda perteneciente a las frecuencias de trabajo de los satélites TerraSAR-X y PAZ (referencia imagen 23).

El azimuth será constante y la elevación sufrirá un barrido desde 0° a 90°, como puede apreciarse en el punto 2.2, el cual hace referencia al documento “*Optimum Corner Reflectors for Calibration of Imaging Radars*”, donde el máximo RCS en un CR, se da para ángulos de elevación  $\theta=54.74^\circ$  y azimuth  $\Phi=45^\circ$ .

Los valores del material han sido introducidos en la opción Design Model Graphically, pestaña “edit material”, donde se introducen los valores de permitividad de 3.7 y tangente de pérdidas de 0.0045 (referencia en punto 2.1.2, imagen 25).

Los parámetros de diseño y visualización introducidos en POFSETS son los descritos en la siguiente tabla:

CR Triangular					
Arista L(m)	1	1,5	2	2,5	3
Grosor(mm)	3	3	3	3	3
Drenaje	NO	NO	NO	NO	NO
Canteo	NO	NO	NO	NO	NO
Frecuencia(GHz)	10	10	10	10	10
Elevación $\theta^\circ$	0:0.1:90	0:0.1:90	0:0.1:90	0:0.1:90	0:0.1:90
Azimuth $\Phi^\circ$	45	45	45	45	45

*Tabla 2: Características de diseño CR triangular con una longitud de arista variable.*

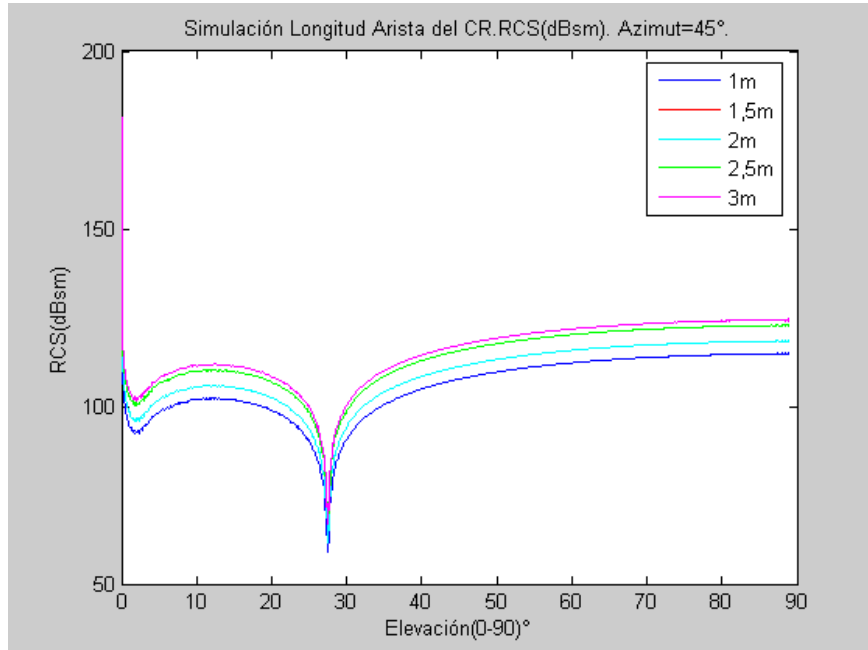


Imagen 37: Simulación RCS longitud Arista monoestático

En la gráfica se aprecia un ligero aumento del valor del RCS según se aumenta la longitud de la arista. En la tabla 3 se detallan los valores máximos de RCS obtenidos para un ángulo de elevación  $\theta=54.74^\circ$  y Azimuth  $\Phi=45^\circ$ .

	RCS a $\theta=54.74^\circ$ (dBsm)
Arista 1m	111.0711
Arista 1,5m	114.5801
Arista 2m	116.5211
Arista 2,5m	119.0153
Arista 3m	120.6170

Tabla 3: RCS Máximos para diferentes valores de arista

Debido a que la longitud de la arista de 3m es la que presenta mayor RCS, se utilizará éste valor como referencia para las próximas simulaciones referidas a un sistema de medidas monoestático.

### 3.2.1.2 DEPENDENCIA CON EL GROSOR DE LOS PERFILES

Se realizará un análisis con longitud fija de 3m de arista, sin orificio de drenaje, sin ángulo de canteo y variando el espesor de las láminas del CR desde 1.5 a 10mm, de ésta forma podremos ver que grosor es el más apropiado para una frecuencia de trabajo de 10GHz.

Los parámetros de diseño introducidos en POFSETS son los descritos en la siguiente tabla:

CR Triangular				
Arista L(m)	3	3	3	3
<b>Grosor(mm)</b>	<b>1.5</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>10</b>
Drenaje	NO	NO	NO	NO
Canteo	NO	NO	NO	NO
Frecuencia(GHz)	10	10	10	10
Elevación $\theta^\circ$	0:0.1:90	0:0.1:90	0:0.1:90	0:0.1:90
Azimuth $\Phi^\circ$	45	45	45	45

Tabla 4: Características de diseño CR triangular con un grosor variable

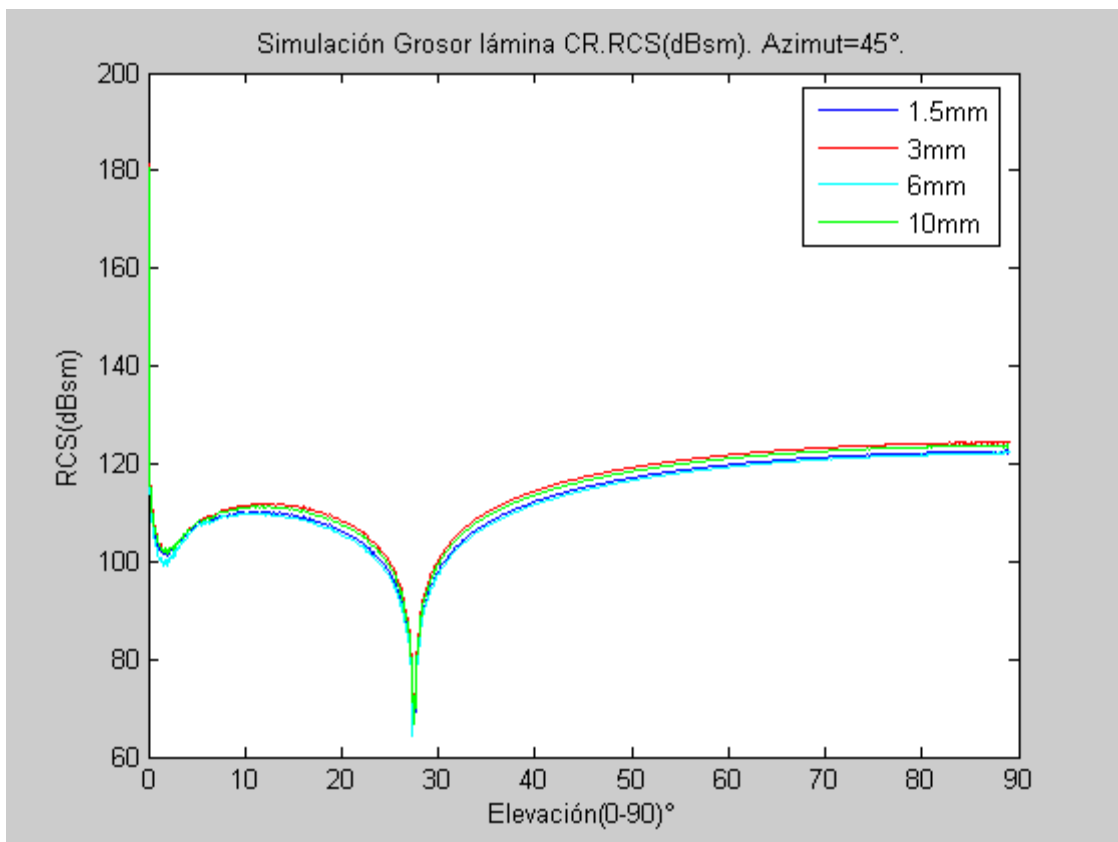


Imagen 38: Simulación RCS Grosor perfil Mono-estático

En la gráfica se aprecia que la RCS varía ligeramente según cambia el grosor del perfil. De hecho los resultados de la RCS para el ángulo de elevación  $54,74^\circ$  presentan una pequeña oscilación en función de los valores de grosor establecidos que se pueden deber a errores en la estimación. Se puede concluir que el valor de RCS es bastante robusto a pequeñas variaciones en el grosor del material con el que está construido el CR.

	RCS a $\theta=54.74^\circ$ (dBsm)
Grosor 1.5mm	118.686
Grosor 3mm	120.617
Grosor 6mm	118.693
Grosor 10mm	119.599

Tabla 5: RCS Máximos para diferentes valores del grosor del perfil

Se ha realizado un cálculo para estimar el peso de un CR con un grosor de lámina de 10mm y longitud de arista de 3m, fabricado con aluminio 7075, cuya densidad es de 2810 kg/m<sup>3</sup>

$$\text{Volumen 1 lamina de CR} = \frac{\text{arista vertical (m)} \times \text{arista horizontal (m)}}{2} \times \text{grosor(m)}$$

$$\text{Volumen 1 lamina de CR} = \frac{3 \times 3}{2} \times 0.01 = 0.045\text{m}^3$$

$$\text{Peso 1 lámina de CR} = \text{Volumen 1 lámina de CR} \times \text{densidad aluminio}$$

$$\text{Peso 1 lámina de CR} = 0.045\text{m}^3 \times 2810 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 126.45\text{kg}$$

$$\text{Peso CR} = 126.45 \times 3 = 379.35\text{kg}$$

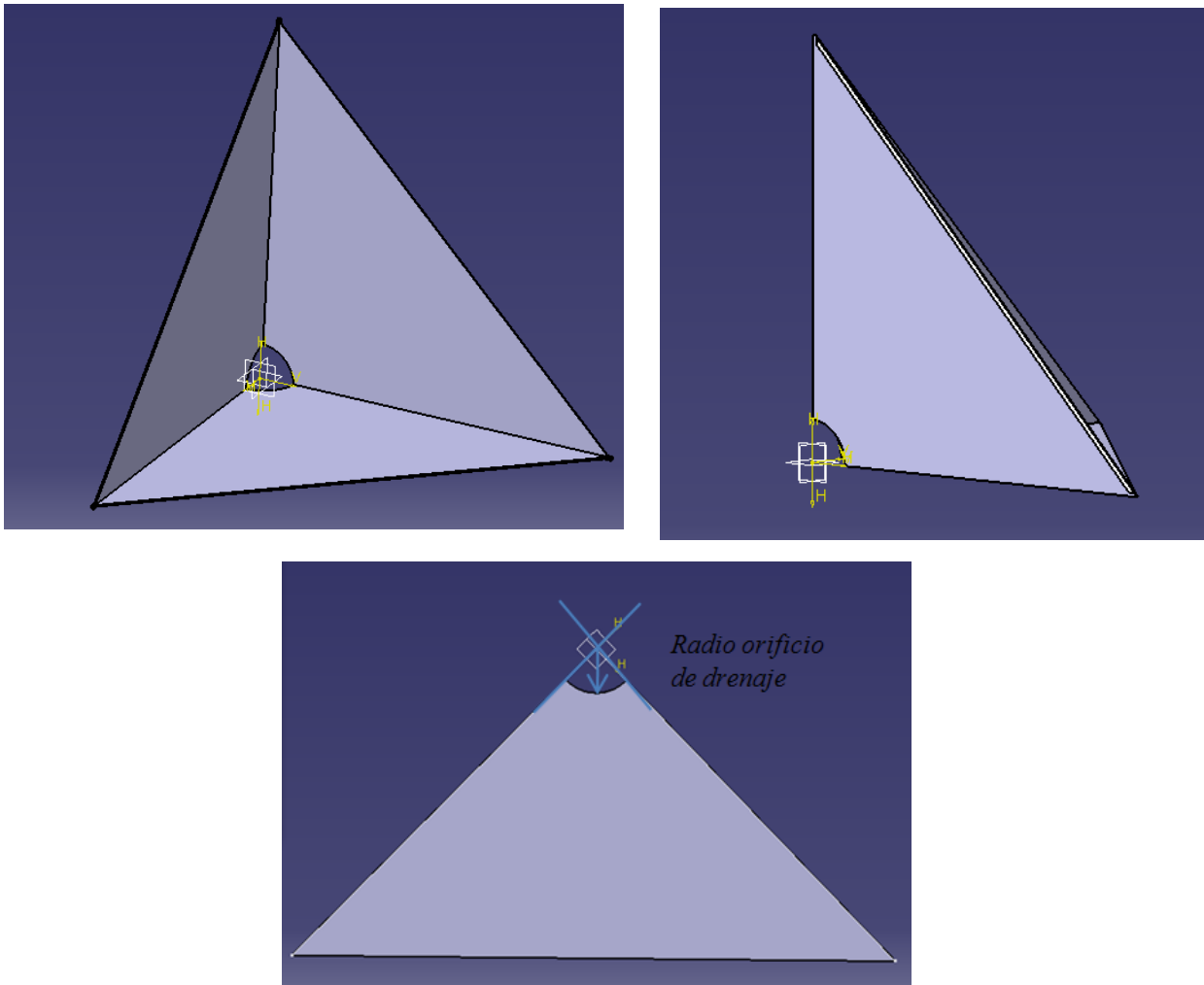
Ecuación 4: Cálculo del peso de un CR arista 3m, espesor láminas 10mm

Aparentemente no es un peso lo suficientemente elevado como para suponer un problema en la manipulación e instalación del CR sobre el terreno de calibración, por lo que para los siguientes apartados se considerará 10mm de grosor como una constante en las simulaciones.

### 3.2.1.3 DEPENDENCIA CON EL TAMAÑO DEL ORIFICIO DE DRENAJE

El ejemplo de orificio de drenaje más común encontrado en la búsqueda de información sobre CR es el orificio circular (referencia a la imagen 39). En este punto se comparará la proporción del orificio de drenaje con la longitud de la arista.





*Imagen 39: CR con orificio circular, sobredimensionado en tamaño pero siguiendo el diseño clásico de orificio de drenaje.*

Se simula el efecto del orificio de drenaje sobre la RCS del CR, aumentando la proporción con respecto al tamaño de la arista. La arista tendrá un tamaño de 3m y un grosor de 10mm, sin canteo. Las proporciones serán de 1%, 2%, 5% y del 10% con respecto a la longitud de la arista dando lugar a radios de orificio de drenaje de 30mm, 60mm, 150mm y 300mm respectivamente (Referencia imagen 8-d)

Los parámetros de diseño y visualización introducidos en POFSETS son los descritos en la siguiente tabla:

CR Triangular				
Arista L(m)	3	3	3	3
Grosor(mm)	10	10	10	10
<b>Drenaje (mm radio)</b>	<b>1% 30</b>	<b>2% 60</b>	<b>5% 150</b>	<b>10% 300</b>
Canteo	NO	NO	NO	NO
Frecuencia(GHz)	10	10	10	10
Elevación $\theta^\circ$	0:0.1:90	0:0.1:90	0:0.1:90	0:0.1:90
Azimuth $\Phi^\circ$	45	45	45	45

*Tabla 6: Características de diseño CR triangular variando el tamaño del orificio de drenaje*

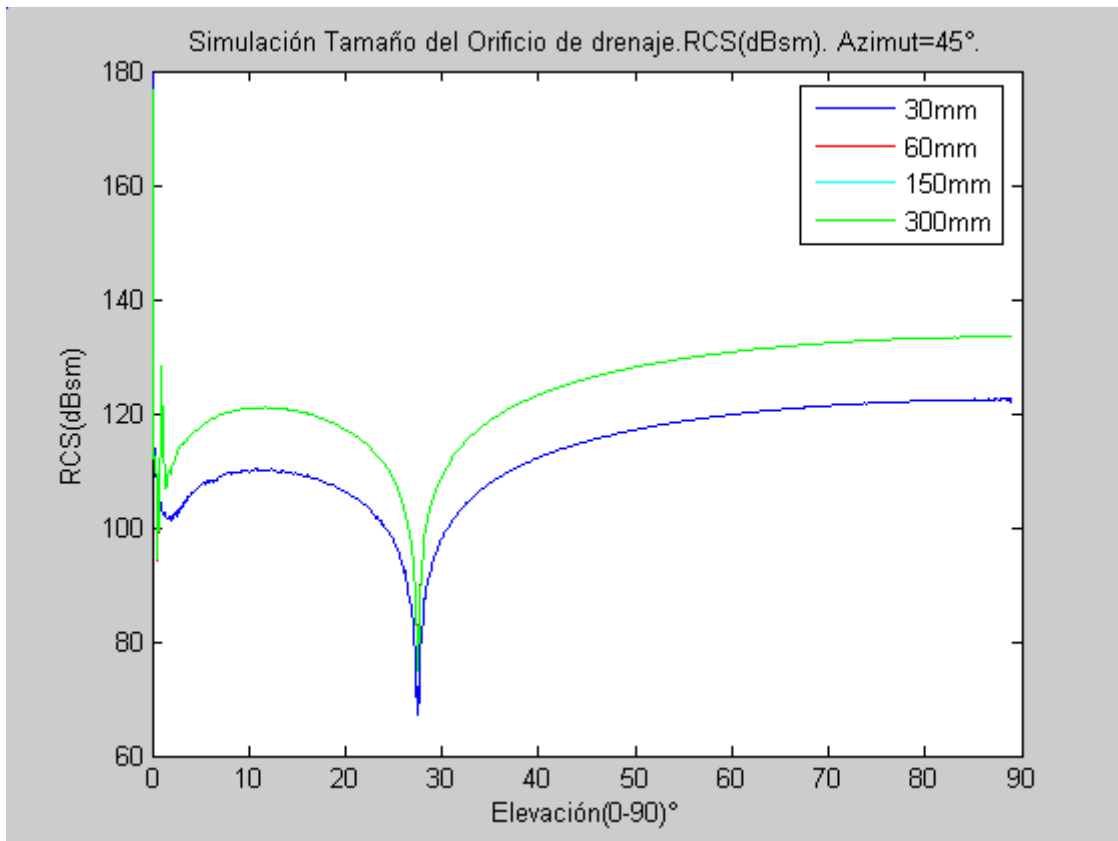


Imagen 40: Simulación RCS Radio orificio drenaje monoestático

Los resultados presentan un salto brusco en el que la RCS aumenta para todos los ángulos de elevación cuando se pasa de 30mm a 60mm de radio del orificio de drenaje. A partir de 60 mm todas las estimaciones para radios superiores se superponen (tendencia ratificada en la tabla 7), por lo que se puede determinar que la RCS no depende de este parámetro siempre y cuando sea mayor a 60 mm y presenta una disminución de la RCS según el radio es menor a este valor umbral.

	RCS a $\theta=54.74^\circ$ (dBsm)
Radio orificio drenaje 1% (30mm)	118.5686
Radio orificio drenaje 2% (60mm)	129.5427
Radio orificio drenaje 5% (150mm)	129.5427
Radio orificio drenaje 10 % (300mm)	129.5427

Tabla 7: RCS Máximos para diferentes valores del grosor del perfil

3.2.1.4 DEPENDENCIA CON EL ÁNGULO DE CANTEO

Se realizará un análisis con longitud de arista de 3m, sin orificio de drenaje, con ángulos de canteo de 0°, 15°, 30°, 45° y manteniendo un espesor constante de 10mm, de esta forma podremos ver el efecto del canteo sobre el CR.

Como se puede ver en la Imagen 8-c, modificaremos el ángulo  $\beta$ , dejando la parte reflectora intacta, manteniendo la distancia de arista sin modificación alguna.

En la imagen 41 se muestra el diseño .CAD del CR, en concreto en el borde de una de las aristas con un canteo de 45°, que es en que se mejor se aprecia el corte. *Por seguridad el canteo no se hará a arista viva, dejando un 10% del Radio del orificio de la lámina.*

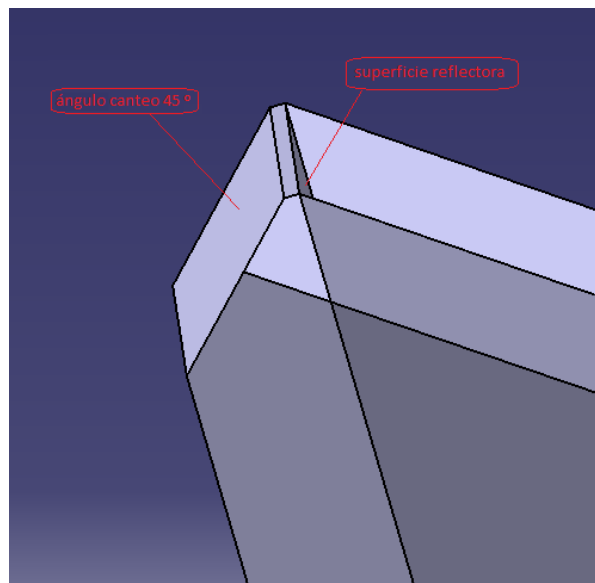


Imagen 41: Ángulo de canteo (45°) sobre diseño real de simulación

Los parámetros de diseño y visualización introducidos en POFSETS son los descritos en la siguiente tabla:

CR Triangular				
Arista L(m)	3	3	3	3
Grosor(mm)	10	10	10	10
Drenaje(mm)	NO	NO	NO	NO
<b>Canteo</b>	<b>0°</b>	<b>15°</b>	<b>30°</b>	<b>45°</b>
Frecuencia(GHz)	10	10	10	10
Elevación $\theta^\circ$	0:0.1:90	0:0.1:90	0:0.1:90	0:0.1:90
Azimuth $\Phi^\circ$	45	45	45	45

Tabla 8: Características de diseño CR triangular variando el ángulo de canteo

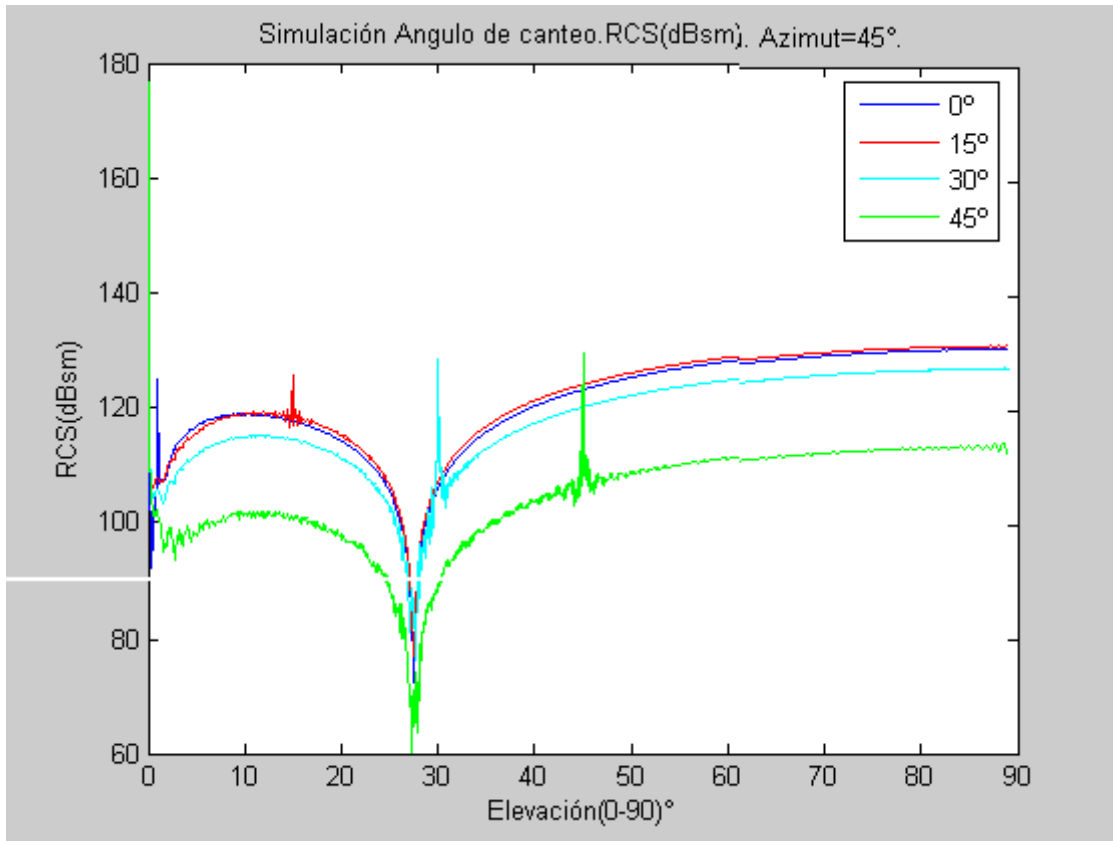


Imagen 42: Simulación RCS Ángulo canteo Mono-estático

En éste caso vemos una evolución clara de la RCS según cambia el ángulo de canteo, pudiendo ver que a menor ángulo de canteo mayor RCS. A medida que el ángulo se va haciendo mayor el decremento es cada mayor asemejando una variación exponencial. En la tabla 9 se presentan esta variación para el ángulo de elevación 54,74°. Otro fenómeno que se identifica en la gráfica, son unos picos en el valor de la RCS en posiciones que coinciden con el valor del ángulo de canteo simulado a 1°, 15°, 30° y 45° respectivamente. Se puede proponer como buen resultado un ángulo de canteo pequeño que proporciona los valores altos de RCS y cuyos picos están lejos del máximo esperado, eliminando posibles ambigüedades.

	RCS a $\theta=54.74^\circ$ (dBsm)	Variación RCS respecto canteo $0^\circ$
Ángulo canteo $0^\circ$	128.5686	0
Ángulo canteo $15^\circ$	129.5427	0.9741
Ángulo canteo $30^\circ$	120.9662	-7.6024
Ángulo canteo $45^\circ$	109.5425	-19.0261

Tabla 9: RCS del ángulo de canteo  $\theta=54.74^\circ$  para diferentes ángulos de canteo

3.2.2 ESTIMACIONES DE RCS BIESTATICA

3.2.2.1 DEPENDENCIA CON EL LARGO DE LAS ARISTAS

Se realizará un análisis con diferentes longitudes de arista, sin orificio de drenaje, sin ángulo de canteo y manteniendo un espesor constante, de ésta forma podremos ver que longitud es la más apropiada para una frecuencia de trabajo de 10GHz.

Los parámetros de diseño y visualización introducidos en POFSETS son los descritos en la siguiente tabla:

CR Triangular					
Arista L(m)	1	1,5	2	2,5	3
Grosor(mm)	3	3	3	3	3
Drenaje	NO	NO	NO	NO	NO
Canteo	NO	NO	NO	NO	NO
Frecuencia(GHz)	10	10	10	10	10
Elevación $\theta^\circ$	0:0.5:90	0:0.5:90	0:0.5:90	0:0.5:90	0:0.5:90
Azimuth $\Phi^\circ$	45	45	45	45	45

Tabla 10: Características de diseño CR triangular, Característica de estudio longitud de Arista

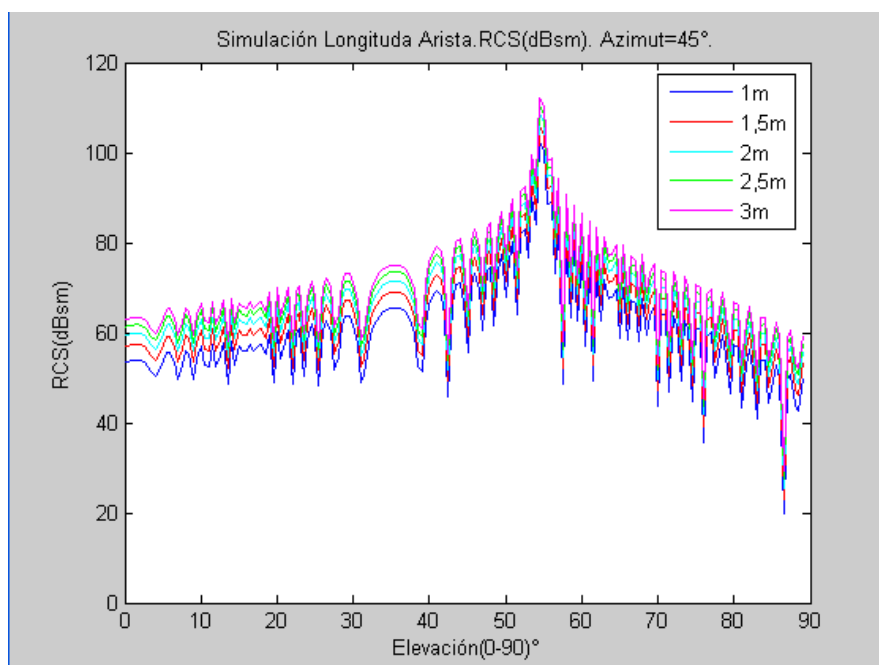


Imagen 43: Simulación RCS longitud Arista

En modo biestático ofrece un ligero cambio, pero no se aprecia con claridad la evolución en la imagen 43, en este caso se propone realizar un zoom (Referencia imagen 44), sobre el ángulo de elevación 54.74°, ya que el ángulo incidente

corresponde con el ángulo de análisis.

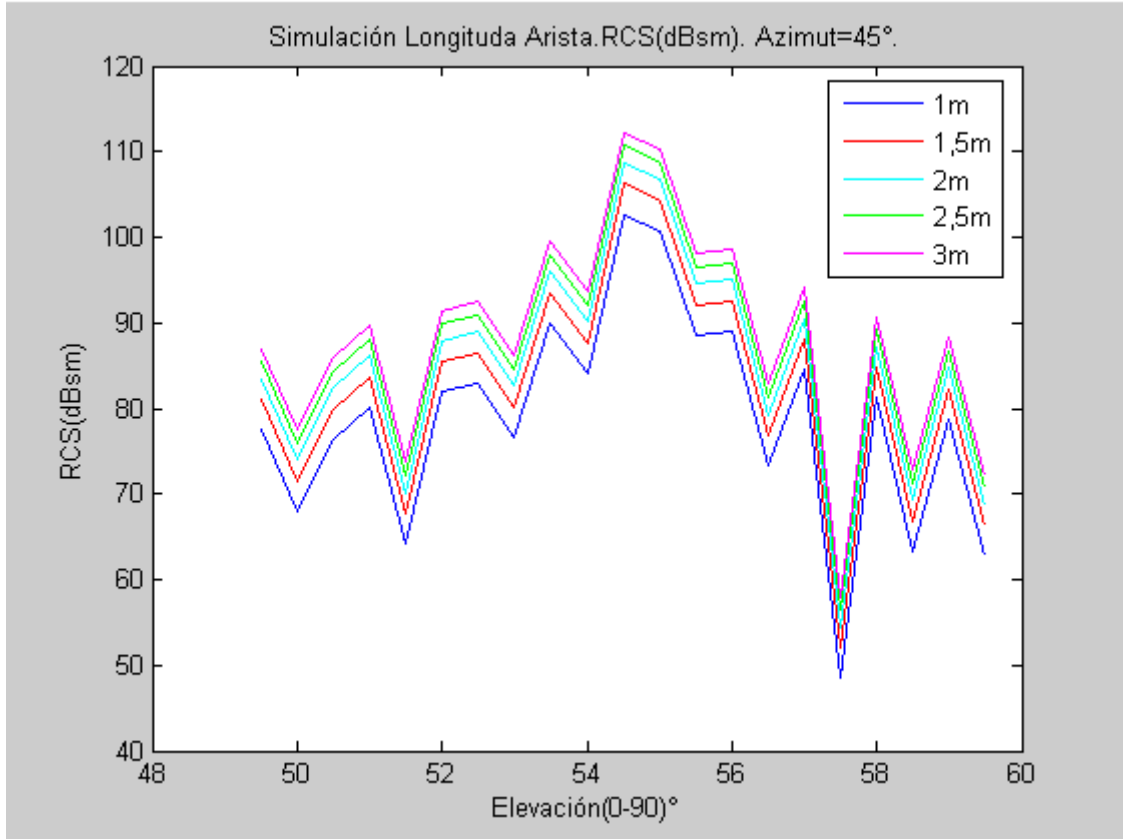


Imagen 44: Zoom Simulación RCS longitud Arista

Como se puede apreciar en las simulaciones, la longitud de 3m ofrece un mayor RCS para el ángulo de ensayo  $\theta=54.74^\circ$ ,  $\Phi=45^\circ$ . Además se puede analizar que es un parámetro que afecta bastante al RCS como se puede ver en la diferencia entre los máximos en la siguiente tabla:

	RCS a $\theta=54.74^\circ$ (dBsm)
Arista 1m	102,6852
Arista 1,5m	106,207
Arista 2m	108,7058
Arista 2,5m	110,644
Arista 3m	112,2276

Tabla 11: RCS Máximos para diferentes valores de arista

La longitud de arista de 3m presenta buenos resultados tanto en modo monoestático como biestático y se mantendrá este tamaño de arista para las próximas simulaciones.

3.2.2.2 DEPENDENCIA CON EL GROSOR DE LOS PERFILES

Se realizará un análisis con longitud fija de 3m de arista, sin orificio de drenaje, sin ángulo de canteo y variando el espesor de las láminas del CR desde 1.5 a 10mm, de ésta forma podremos ver que grosor es el más apropiado para una frecuencia de trabajo de 10GHz.

Los parámetros de diseño y visualización introducidos en POFSETS son los descritos en la siguiente tabla:

CR Triangular				
Arista L(m)	3	3	3	3
<b>Grosor(mm)</b>	<b>1.5</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>10</b>
Drenaje	NO	NO	NO	NO
Canteo	NO	NO	NO	NO
Frecuencia(GHz)	10	10	10	10
Elevación $\theta^\circ$	0:0.5:90	0:0.5:90	0:0.5:90	0:0.5:90
Azimuth $\Phi^\circ$	45	45	45	45

Tabla 12: Características de diseño CR triangular, Característica de estudio Grosor lámina CR

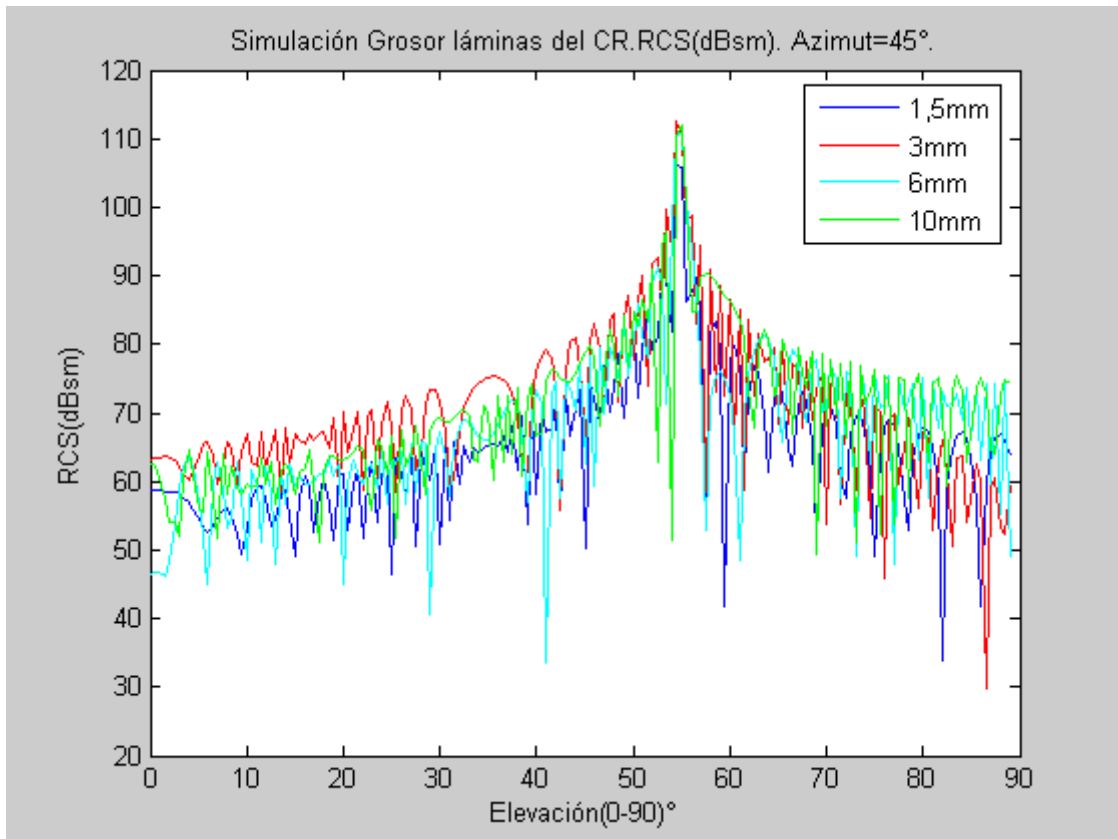


Imagen 45: Simulación RCS grosor CR, arista 3m



En la imagen 45 se presenta la variación de RCS en todos los ángulos de elevación considerados y en la imagen 46 se detalla un zoom en torno al punto del rayo incidente a elevación  $54.74^\circ$  y Azimuth  $45^\circ$  para facilitar la interpretación de los resultados.

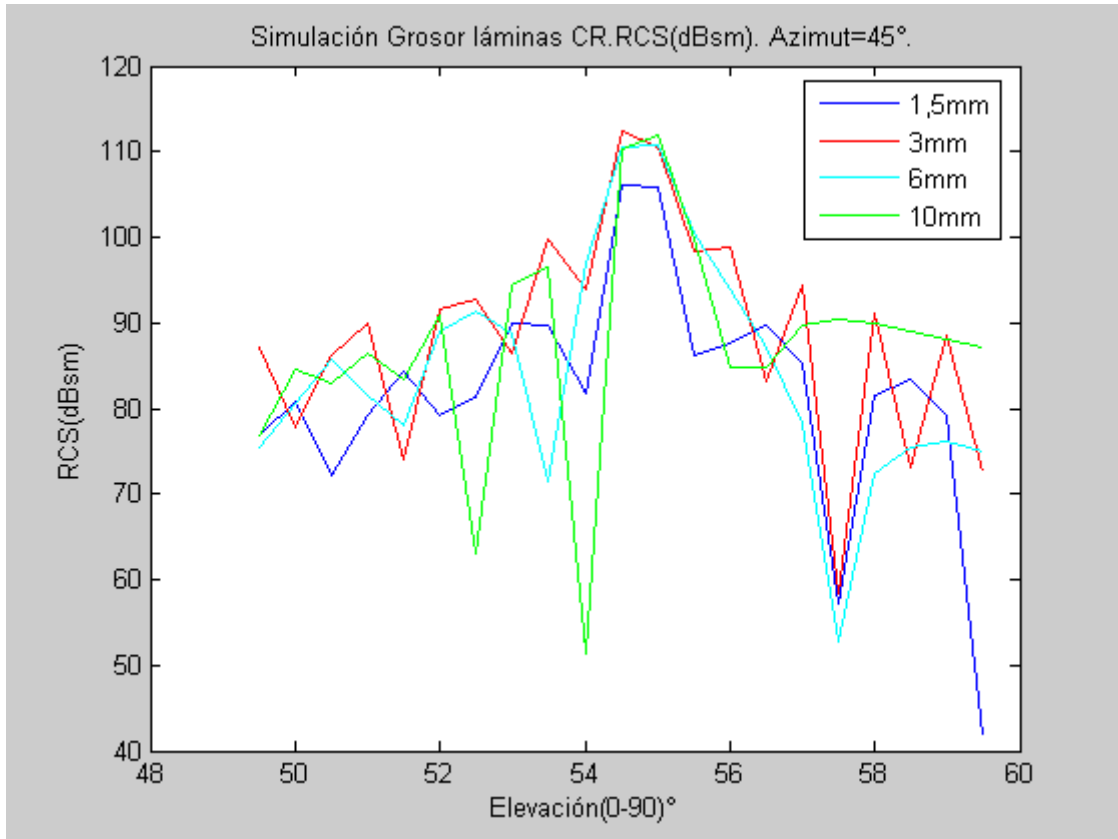


Imagen 46: Zoom Simulación RCS grosor CR, arista 3m

	RCS a $\theta=54.74^\circ$ (dBsm)
Grosor 1,5mm	106,0448
Grosor 3mm	112,466
Grosor 6mm	110,7502
Grosor 10mm	111,9133

Tabla 13: RCS Máximos para diferentes grosores, arista 3m

En los resultados se presenta como la RCS es prácticamente constante, quitando pequeños errores de estimación, a partir de un grosor de 3 mm. Para confirmar esta tendencia se ha realizado una estimación de la RCS con una mayor resolución, incremento en el ángulo de elevación de  $0.1^\circ$  en lugar de  $0.5^\circ$ , utilizado hasta ahora.

Los parámetros de diseño y visualización introducidos en POFSETS son los descritos en la siguiente tabla:

CR Triangular				
Arista L(m)	3	3	3	3
<b>Grosor(mm)</b>	<b>1.5</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>10</b>
Drenaje	NO	NO	NO	NO
Canteo	NO	NO	NO	NO
Frecuencia(GHz)	10	10	10	10
<b>Elevación <math>\theta^\circ</math></b>	<b>0:0.1:90</b>	<b>0:0.1:90</b>	<b>0:0.1:90</b>	<b>0:0.1:90</b>
Azimuth $\Phi^\circ$	45	45	45	45

Tabla 14: Características de diseño CR triangular variando el grosor y permitiendo una resolución mayor en la estimación de la RCS con el ángulo de elevación

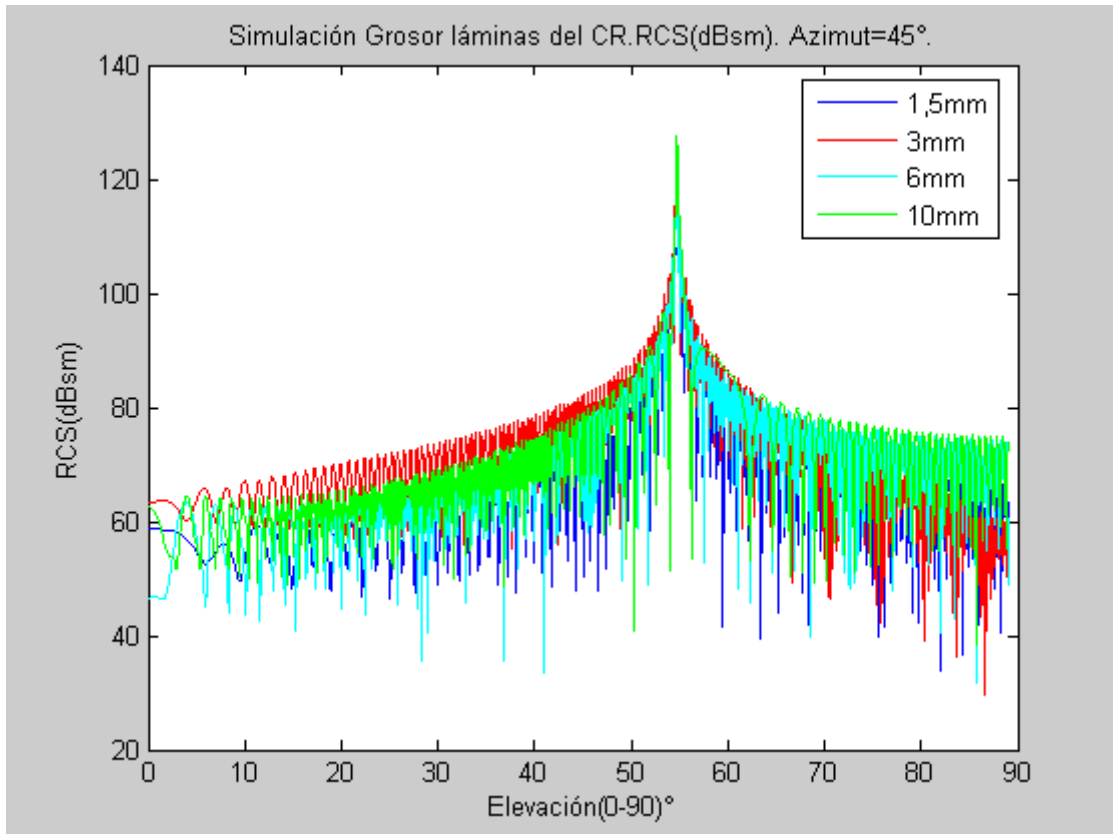


Imagen 47: Simulación RCS grosor CR, arista 3m

Los resultados se presentan en la imagen 47, estimación completa de la RCS para todos los ángulos de elevación, en la imagen 48, presentando un zoom sobre el ángulo de interés y en la tabla 15 con los valores exactos para el ángulo de interés. Se aprecia un salto incremental entre un grosor de 1,5 y 3 mm. A partir de éste valor se nota un ligero incremento con el grosor. En cuanto a fabricación no podemos determinar que éste

incremento justifique un aumento de gasto en el diseño de CRs pero para continuar los estudios teóricos consideraremos a partir de ahora un grosor de 10 mm.

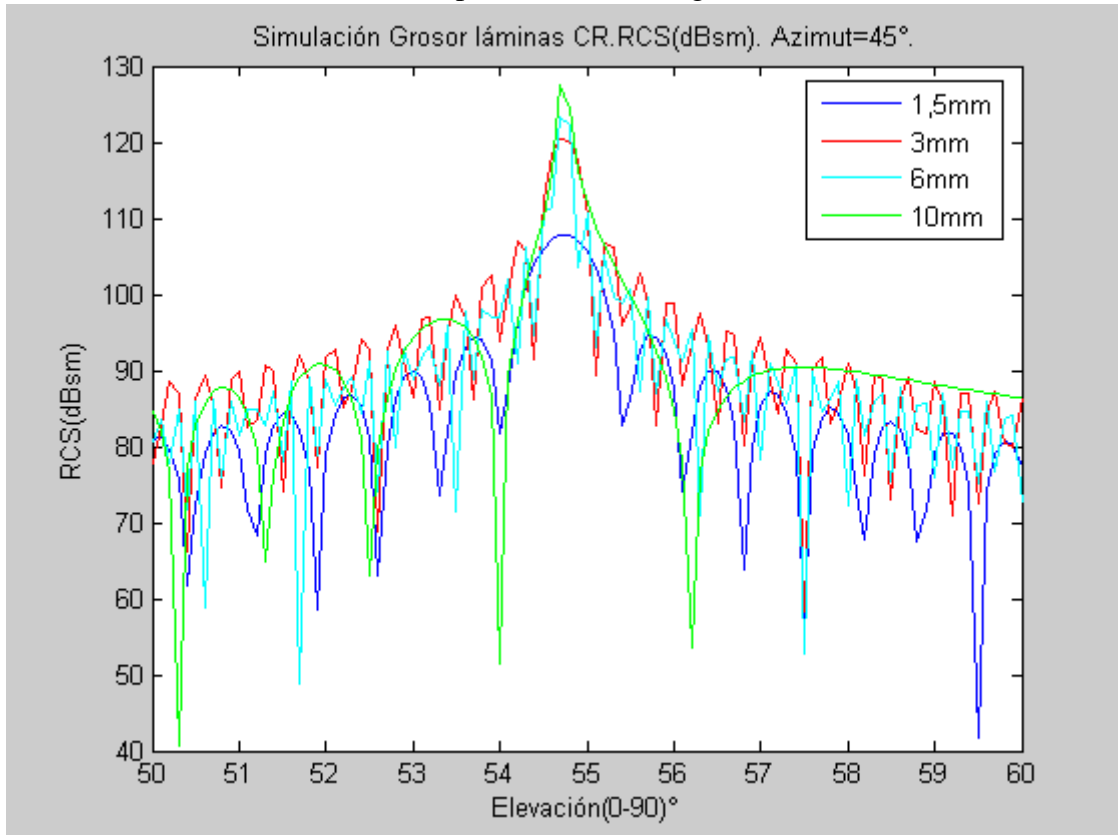


Imagen 48: Zoom Simulación RCS grosor CR, arista 3m

	RCS a $\theta=54.74^\circ$ (dBsm)
Grosor 1,5mm	107.7606
Grosor 3mm	120.4236
Grosor 6mm	123.3227
Grosor 10mm	127.5316

Tabla 15: RCS Máximos para diferentes Grosos. Arista 3m

### 3.2.2.3 DEPENDENCIA CON EL ORIFICIO DE DRENAJE

En éste apartado se simula el efecto del orificio de drenaje sobre el RCS del CR, aumentando la proporción con respecto al tamaño de la arista (referencia a la imagen del orificio de drenaje representado en el monoestático, imagen 40). La arista tendrá un tamaño de 3m y un grosor de 10mm, sin canteo. Las proporciones serán de 1%, 2%, 5% y del 10% con respecto a la longitud de la arista.

Los parámetros de diseño introducidos en POFSETS son los descritos en la tabla 16, donde se ha mantenido una resolución angular de  $0,1^\circ$  como en el apartado anterior.

CR Triangular				
Arista L(m)	3	3	3	3
Grosor(mm)	10	10	10	10
<b>Drenaje (mm radio)</b>	<b>1%</b> <b>30</b>	<b>2%</b> <b>60</b>	<b>5%</b> <b>150</b>	<b>10%</b> <b>300</b>
Canteo	NO	NO	NO	NO
Frecuencia(GHz)	10	10	10	10
Elevación $\theta^\circ$	0:0.1:90	0:0.1:90	0:0.1:90	0:0.1:90
Azimuth $\Phi^\circ$	45	45	45	45

Tabla 16: Características de diseño CR triangular, Característica de estudio radio orificio de drenaje a  $0.1$

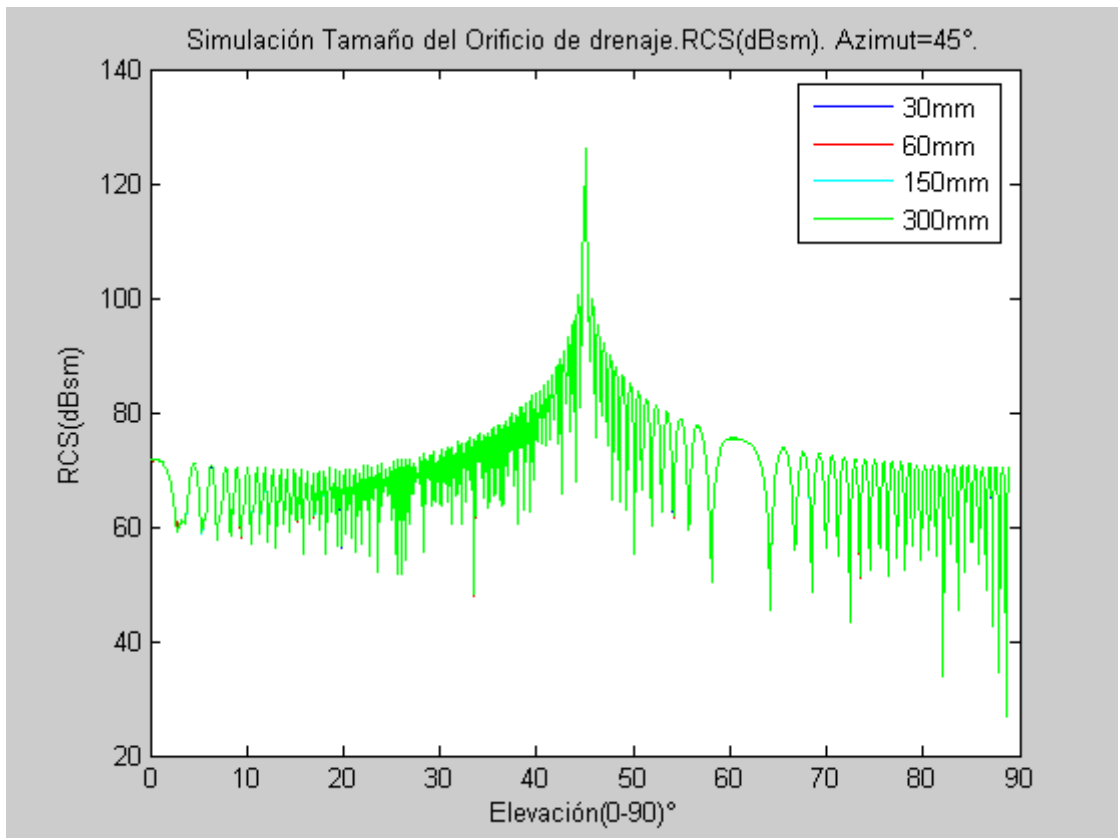


Imagen 49: Simulación RCS radio orificio de drenaje a  $0.1$

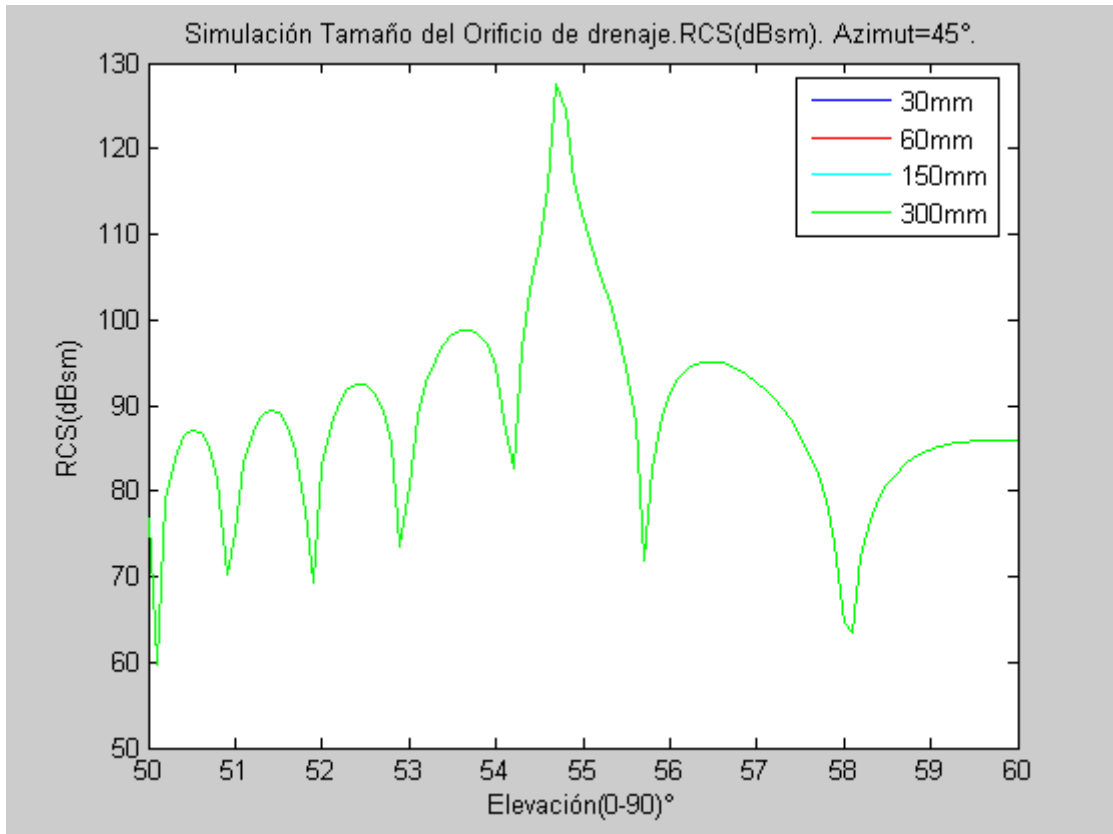


Imagen 50: Zoom Simulación RCS radio orificio de drenaje a 0.1

	RCS a $\theta=54.74^\circ$ (dBsm)
Radio del orificio 30mm	127.4509
Radio del orificio 60mm	127.4509
Radio del orificio 150mm	127.4509
Radio del orificio 300mm	127.4509

Tabla 17: RCS Máximos para radios del orificio de drenaje

Como se observa en la simulación realizada (referencia a las imágenes 50 y 51) no se aprecia ninguna diferencia ni en las gráficas comparativas de la RCS, ni en la tabla 17. Como en el caso del monoestático, la RCS del CR presenta una gran robustez frente al tamaño del orificio de drenaje. Según lo expuesto, para el criterio de diseño del CR se debe optar por un radio de orificio de drenaje de un tamaño reducido, lo suficientemente grande, como para que pueda evacuar el agua caída sobre el CR estando en el terreno de calibración.

3.2.2.4 DEPENDENCIA CON EL ANGULO DE CANTEO

Se realizará un análisis con longitud de arista de 3m, sin orificio de drenaje, con ángulos de canteo de 0°, 15°, 30°, 45° y manteniendo un espesor constante de 10mm, de ésta forma podremos ver el efecto del canteo sobre el CR.

Los parámetros de diseño y visualización introducidos en POFSETS son los descritos en la siguiente tabla:

CR Triangular				
Arista L(m)	3	3	3	3
Radio del orificio(mm)	10	10	10	10
Drenaje(mm)	NO	NO	NO	NO
<b>Canteo</b>	<b>0°</b>	<b>15°</b>	<b>30°</b>	<b>45°</b>
Frecuencia(GHz)	10	10	10	10
Elevación $\theta^\circ$	0:0.1:90	0:0.1:90	0:0.1:90	0:0.1:90
Azimuth $\Phi^\circ$	45	45	45	45

Tabla 18: Características de diseño CR triangular, Característica de estudio Ángulo de canteo

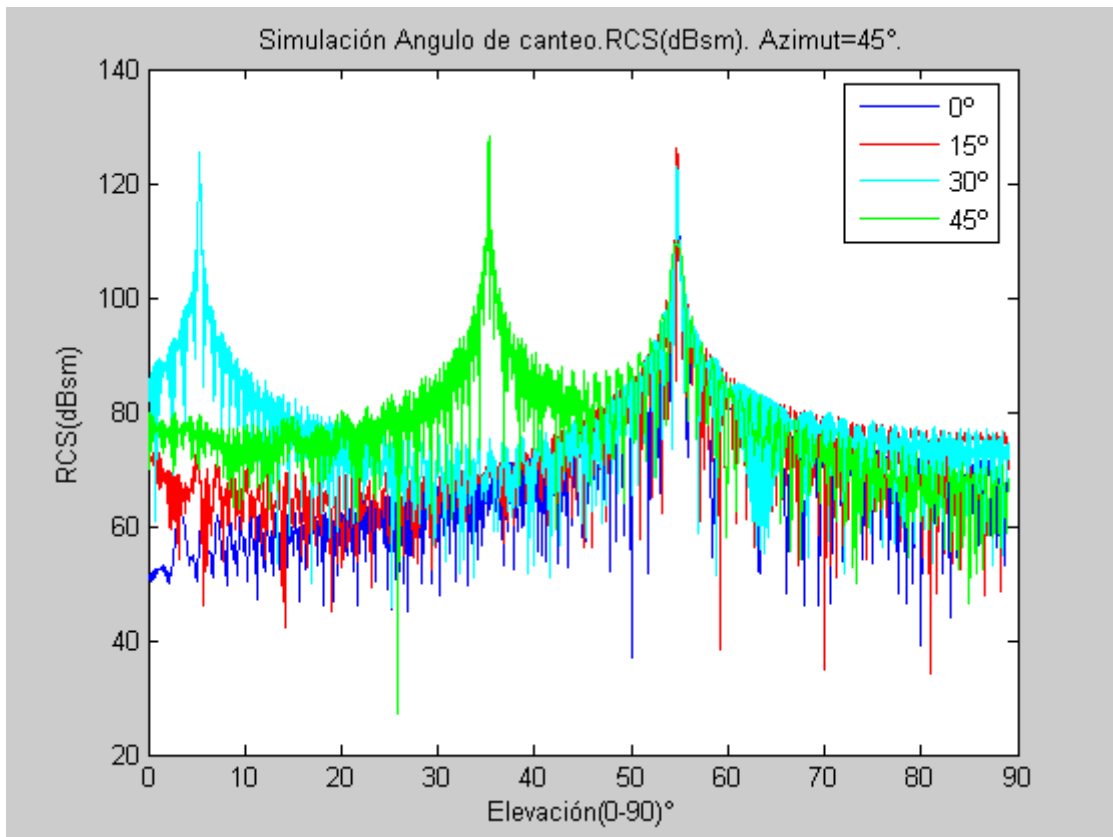


Imagen 51: Simulación RCS Ángulo de canteo

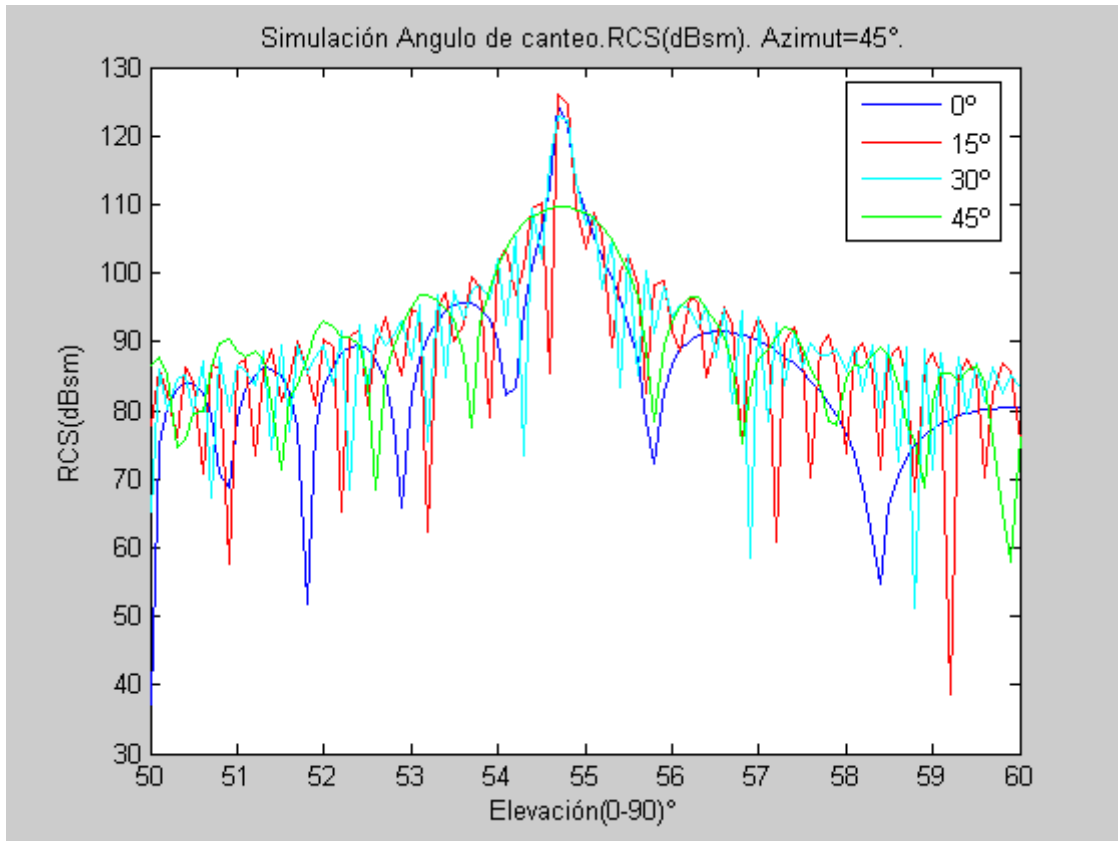


Imagen 52: Zoom Simulación RCS Ángulo de canteo

En la imagen 51 se obtienen unos resultados diferentes con respecto al análisis monoestático, como se puede apreciar en los ángulos  $0^\circ$  y  $15^\circ$  presentan un único pico de la RCS en torno al ángulo de interés, mientras que para los ángulos de canteo de  $30^\circ$  y  $45^\circ$  aparece un segundo pico diferente al ángulo de observación de elevación  $54.74^\circ$ . Los valores asociados al primer y segundo pico en ángulo de elevación y valor de RCS se detallan en la tabla 19.

	Elevación $\theta^\circ$	RCS (dBsm)	Segundo pico RCS $\theta^\circ$	RCS (dBsm)
Canteo $0^\circ$	54.74	124.4512		
Canteo $15^\circ$	54.74	126.0792		
Canteo $30^\circ$	54.74	122.8626	4.6	125.4682
Canteo $45^\circ$	54.74	109.7973	34.82	128.1416

Tabla 19: RCS Máximos ysegundos picos

Analizando los resultados en torno al ángulo de interés, imagen 52, se puede observar que un ángulo de canteo demasiado pronunciado disminuye la RCS. Además, para éstos valores de ángulo de canteo, aparece un segundo pico de RCS mayor, lejos del ángulo de elevación deseado, provocando posibles equivocaciones a la hora de realizar la calibración de la imagen SAR.

Por lo tanto, se propone optar por un ángulo de canteo,  $15^{\circ} \leq \text{ángulo de canteo} < 30^{\circ}$  para obtener valores grandes de RCS y evitar la aparición del segundo pico fuera del ángulo de observación.



## CONCLUSIONES

Se han realizado estimaciones de CR con el programa de POFACETS de uso libre, el cual ofrece un análisis rápido sobre figuras complejas de ensayo. Su manejo es sencillo aunque no demasiado intuitivo. Una de las principales características de las que disponen la mayoría del software de pago, es la del cálculo de múltiples reflexiones, donde POFACETS intenta solventar esta limitación con el cálculo del RCS mediante reflexiones simples y múltiples sumatorios de series de Taylor.

Para realizar el estudio de los CR se han seguido los siguientes criterios:

Parámetros fijos en todas las simulaciones.

- Material de construcción. Aluminio 7075 con densidad 2810 kg/m<sup>3</sup>, permitividad de 3.7 y una tangente de pérdidas de 0.0045.
- Frecuencia de trabajo 10GHz
- Ángulo de observación e incidencia monoestático. Elevación  $\theta^\circ$  (0°:0.1°:90°). Azimuth  $\Phi^\circ=45^\circ$  (Azimuth constante en todas las simulaciones)
- Ángulo de observación biestático. Elevación  $\theta^\circ$  (0°:0.1°:90°). Azimuth  $\Phi^\circ=45^\circ$  (Azimuth constante en todas las simulaciones).
- Angulo de incidencia biestático. Elevación  $\theta^\circ=54.74^\circ$ , Azimuth  $\Phi^\circ=45^\circ$  (Constante en todas las simulaciones)
- Influencia de tierra en el plano XY.

Parámetros a estudio.

- En función de longitud de la arista.  $l$  (1m, 1.5m, 2m, 2.5m, 3m)
- En función del grosor de la lámina.  $g$  (1.5mm, 3mm, 6mm, 10mm)
- En función del radio del orificio de drenaje.  $r$  (30mm, 60mm, 150mm, 300mm)
- En función del ángulo de canteo.  $\beta$  (0°, 15°, 30°, 45°)

En función de los resultados obtenidos se puede realizar una estimación de las características de diseño de un CR.

En función de la longitud de la arista:

Tanto en el análisis biestático como en el monoestático a mayores longitudes de ésta, mayor nivel RCS, siendo la longitud de 3m la que ofrece mejores resultados. No debemos olvidar que la función de los CRs es la de calibrar satélites de observación terrestre y para ello, son situados en lugares de exterior estratégicos. Un tamaño reducido facilita la instalación y manipulación en los diversos tipos de terreno (rocoso, con vegetación, embarrado...) que se pueden encontrar.

En función del grosor de la lámina:

En el análisis monoestático la RCS presenta cierta robustez frente a este parámetro. En el resultado del análisis biestático se observa un valor mínimo de grosor a partir del cual se obtienen valores de RCS considerables. A partir de ese umbral la RCS aumenta ligeramente con el grosor, obteniendo los mejores resultados para 10mm. De cualquier forma, un excesivo grosor haría del CR un objeto difícil de manipular e instalar sobre el terreno de calibración, por lo que se deberá llegar a un compromiso entre nivel de RCS y capacidad a la hora de instalar el CR en el lugar de calibración.

En función del radio del orificio de drenaje:

En función de los resultados obtenidos en los análisis monoestático y biestático, se muestra que la RCS prácticamente no depende de este parámetro, aunque los mejores resultados se correspondan a orificios pequeños. Se podría deducir que un buen radio de orificio de drenaje es aquel que pueda proporcionar la evacuación suficiente de agua en condiciones de lluvia intensa, se podría establecer como referencia un 5% de la longitud de la arista, que en nuestro caso de estudio, arista de 3m de longitud corresponde con 150mm (15cm).

En función del ángulo de canteo:

Tanto para en análisis monoestático como para el biestático, los resultados obtenidos son parecidos, pudiéndose apreciar un ligero aumento del RCS para los 15° del ángulo de canteo y luego sufre una reducción del mismo para los ángulos a 30° y 45°.

También se puede apreciar que ambos análisis ofrecen unos picos en el RCS posicionados fuera del ángulo de observación elevación 54,74°, principalmente para ángulos de canteo grandes, que podrían conllevar errores en el proceso de calibración de la imagen SAR.

## CONCLUSIONES

---

En función del análisis individual a cada criterio de diseño se podría establecer un CR que ofrezca el máximo RCS.

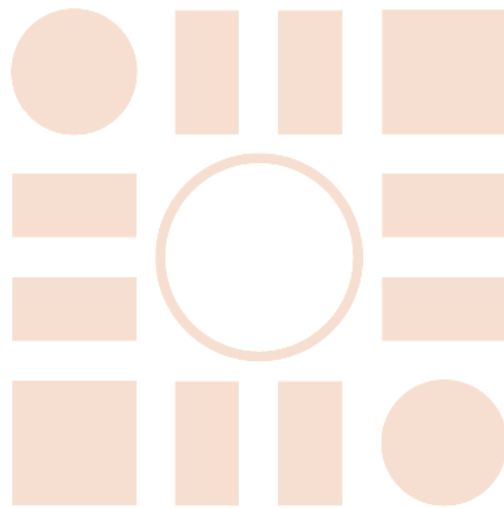
Longitud arista (m)	Grosor de lámina (mm)	Radio orificio de drenaje (mm)	Ángulo de canteo (°)
3	10	150	15

Este estudio se podría continuar, utilizando una herramienta de simulación que considere el cálculo de reflexiones múltiples, tales como NEWFASAN, FASCRO, HFSS-IE o FEKO, que ratifiquen las conclusiones y tendencias mostradas en este TFG.

## BIBLIOGRAFIA

- [B-1] Development of code for a physical optics Radar cross section prediction and analysis application. Filippou Chatzigeorgiadis. September 2004.
- [B-2] Synthetic Aperture Radar: Principles and Applications. 4<sup>th</sup> Advanced training course in land remote sensing. Harokipio University. July 2013.
- [B-3] The Design of Radar Corner Reflectors for the Australian Geophysical Observing System. Garthwaite, M. C., Nancarrow, S., Hislop, A., Thankappan, M., Dawson, J.H., Lawrie, S. Marck 2015
- [B-4] Optimum Corner Reflectors for Calibration of Imaging Radars. Kamal Sarabandi and Tsen-Chieh Chiu. VOL 44. NO.10. OCTOBER 1996.
- [B-5] TerraSAR-X Calibration Ground equipment. Proceedings of WFMN07. German Aerospace Center. Björn. Döring, Marco Schwerdt, Robert Bauer. 2007
- [B-6] Sistema de medida polivalente con configuración Bi-estática para Ensayos Electromagnéticos. David Escot Bocanegra. Tesis Doctoral UAH. 2012
- [B-7] Computation of radar cross sections of complex targets by physical optics with modified surface normals. Ahmet Cemal Durgun. August 2008

Universidad de Alcalá  
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR



Universidad  
de Alcalá