

PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO

***CÁLCULO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE RADAR (RCS) DE UNA
PLACA PLANA Y DE UN CILINDRO, PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO
DE AEROGENERADORES EN SISTEMAS DE NAVEGACIÓN AÉREA***

SARA ISABEL PÉREZ RESTREPO

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA AERONÁUTICA
MEDELLÍN**

2013

**CÁLCULO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE RADAR (RCS) DE UNA
PLACA PLANA Y DE UN CILINDRO, PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO
DE AEROGENERADORES EN SISTEMAS DE NAVEGACIÓN AÉREA**

SARA ISABEL PÉREZ RESTREPO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Aeronáutico

Director

ROBERTO CARLOS HINCAPIÉ REYES

Ingeniero Electrónico, Ph. D

Asesor

VÍCTOR MANUEL GORDO ARIAS

Máster en Ingeniería Aeronáutica

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA AERONÁUTICA

MEDELLÍN

2013

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma

Nombre: _____

Presidente del Jurado

Firma

Nombre: _____

Jurado

Firma

Nombre: _____

Jurado

Medellín, 14 de agosto de 2013

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS.....	14
1. FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE EL RADAR	15
1.1. FUNCIONAMIENTO DEL RADAR.....	15
1.2. RADAR BIESTÁTICO	17
1.3. BANDAS DE FRECUENCIA.....	19
3. IMPORTANCIA DE LA PREDICCIÓN Y MEDICIÓN DE LA RCS EN LA INDUSTRIA AÉREA & ALGUNOS ESTUDIOS	25
4. SECCIÓN TRANSVERSAL DE RADAR – CONCEPTOS TÉCNICOS	30
4.1. DEFINICIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE RADAR.....	30
4.2. MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE LA RCS	34
4.2.1. Métodos analíticos o exactos	35
4.2.2. Métodos de baja frecuencia	36
4.2.3. Métodos de alta frecuencia	39
5. ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DE LA RCS BIESTÁTICA DE CUERPOS SIMPLES	43
5.1. RCS BIESTÁTICA DE UNA PLACA PLANA	43
5.1.1. Cálculo teórico.....	43
5.1.2. Algoritmo en Matlab	50
5.2. RCS BIESTÁTICA DE UN CILINDRO	54
5.2.1. Cálculo teórico.....	55
5.2.2. Algoritmo en Matlab	59
5.3. RCS DE LA FORMA COMPLEJA.....	64
5.3.1. Cálculo teórico.....	65
5.3.2. Algoritmo en Matlab	66
6. ANÁLISIS DE LA RCS	70
6.1. PLACA PLANA (DISCO).....	70

6.2. CILINDRO.....	75
6.3. APROXIMACIÓN AL AEROGENERADOR	80
7. CONCLUSIONES.....	90
BIBLIOGRAFÍA.....	93
ANEXOS.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Radar monoestático.....	15
Figura 2. Radar biestático.....	16
Figura 3. Representación de la medición de la RCS.	18
Figura 4. Esquema de representación del ángulo biestático	18
Figura 5. Guglielmo Marconi con el teléfono sin hilos.....	21
Figura 6. Sir Robert Watson Watt con radar de la época.....	21
Figura 7. Frente de tormenta apreciada bidimensionalmente por un radar meteorológico	22
Figura 8. Representación gráfica del “Efecto Doppler” en términos de la longitud de onda.....	22
Figura 9. Sección recta radar normalizada de una esfera conductora perfecta en función de la relación radio/longitud de onda.....	23
Figura 10. Muestra de modelo en 3D de buque de la Armada Nacional de Colombia visualizando la RCS del mismo	24
Figura 11. Implementación de vehículos eléctricos en operaciones de plataforma aeroportuaria.....	26
Figura 12. Aerogenerador en el aeropuerto de La Palma-España.....	26
Figura 13. Antena Transmisora y Receptora para medición de RCS sobre un Aerogenerador	27
Figura 14. DVOR en El Perdón (Navarra).....	28
Figura 15. RCS de las diferentes partes de un aerogenerador.....	28
Figura 16. Cortes en vertical en la simulación de la RCS del aerogenerador a	29
Figura 17. Definición intuitiva para sección transversal de radar	31
Figura 18. Valores de RCS para blancos típicos	32
Figura 19. Relación entre coordenadas cartesianas y ángulo β , para el disco	44
Figura 20. Extracción del plano imaginario que contiene TX, RX y r_{ref}	45
Figura 21. Triangulación y semejanza de triángulos para RCS del disco	45
Figura 22. Proyección del punto RX y el TX sobre eje horizontal imaginario.....	47
Figura 23. Diagrama de flujo del algoritmo para determinar la RCS del disco.....	51
Figura 24. Traslación y rotación del disco en el espacio.....	52
Figura 25. Diagrama de flujo para el algoritmo de cambio de coordenadas	53
Figura 26. Diagrama de flujo para la función RCS_disco	54
Figura 27. Ubicación del cilindro en el espacio en coordenadas esféricas	56
Figura 28. Coordenadas cartesianas del transmisor y receptor respecto al origen.....	57
Figura 29. Mapa de flujo del algoritmo para la RCS del cilindro	60
Figura 30. Traslación del cilindro en el espacio	61

Figura 31. Diagrama de flujo para la función de cambio de coordenadas	62
Figura 32. Diagrama de flujo para la función RCS_Cilindro.....	63
Figura 33. Aproximación de aerogenerador a formas simples.....	65
Figura 34. Dimensionamiento de formas simples	65
Figura 35. Diagrama de flujo para la creación del aerogenerador	67
Figura 36. Diagrama de flujo para la evaluación de la RCS de los aerogeneradores	68
Figura 37. Ubicación relativa del disco en el espacio	70
Figura 38. RCS del disco vs. Posición del receptor, con variación en la frecuencia	72
Figura 39. RCS del disco vs. Posición del receptor, con variación en R_u	74
Figura 40. Ubicación relativa del cilindro en el espacio	75
Figura 41. RCS del cilindro vs. Ubicación del receptor, con variación en la frecuencia	77
Figura 42. RCS del cilindro vs. Ubicación del receptor, variando R_u	79
Figura 43. RCS de un aerogenerador vs. Altura del receptor, variando la frecuencia	82
Figura 44. RCS del aerogenerador vs. Altura del receptor, con distancia simétrica	84
Figura 45. Ubicación de los aerogeneradores en el plano xy	85
Figura 46. RCS de los 27 aerogeneradores vs. Ubicación del receptor	86
Figura 47. Ubicación aproximada de 51 aerogeneradores en el plano xy	88
Figura 48. RCS del conjunto de 51 aerogeneradores vs. Ubicación del receptor.	89
Figura 49. Obstáculos de Aeródromo	96
Figura 50. Ubicación real del Transmisor y el objeto	96
Figura 51. Distancia relativa entre Radar y Aerogenerador (R_{to})	97

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Designación estándar IEEE para bandas de radio frecuencia	19
Tabla 2. Valores de RCS para aeronaves específicas.....	32
Tabla 3. Valores mínimos de RCS en el rango de frecuencias establecido.....	72
Tabla 4. Valores mínimos de RCS en el rango de R_u establecido	74
Tabla 5. RCS del cilindro en la banda de frecuencia L	77
Tabla 6. Valores de RCS mínimos para el cilindro para las distancias R_u específicas	79
Tabla 7. Valores de RCS mínimos para un aerogenerador en función del cambio en la frecuencia.....	82
Tabla 8. Valores de RCS mínima para una aerogenerador ubicado simétricamente	84
Tabla 9. Altura del receptor donde la RCS es mínima variando la frecuencia	87
Tabla 10. Valores de mínima RCS para las diferentes frecuencia, en el caso de 51 aerogeneradores.....	89

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Ubicación del Transmisor respecto al origen de las coordenadas absolutas

ANEXO B. Algoritmo para cambio de coordenadas

ANEXO C. Algoritmos en Matlab para el disco

ANEXO D. Algoritmos en Matlab para el cilindro

ANEXO E. Algoritmos para RCS de aerogeneradores

ANEXO F. Gráficas ampliadas

ANEXO G. Paper

LISTA DE ABREVIACIONES

- ❖ **ATC:** Air Traffic Controller (Controlador de Tráfico Aéreo)
- ❖ **DVOR:** VOR Doppler.
- ❖ **EM:** Electromagnetic (Onda electromagnética)
- ❖ **FFT:** Fast Fourier Transform (Transformada rápida de Fourier)
- ❖ **MoM:** Method of Moments (Método de los momentos)
- ❖ **RCS:** Radar Cross Section (Sección Transversal de Radar)
- ❖ **VOR:** VHF Omnidirectional Radio Range (Radiofaro Omnidireccional de muy alta frecuencia)
- ❖ **TX:** Transmisor
- ❖ **RX:** Receptor

GLOSARIO

AEROGENERADOR: aparato que transforma la energía eólica en energía eléctrica mediante rotores de palas.

ATC: siglas en inglés para designar al *AIR TRAFFIC CONTROLLER* o controlador de tránsito/tráfico aéreo, quien es la persona encargada de dirigir el tránsito de aeronaves en el espacio aéreo y en los aeropuertos de modo seguro, ordenado y rápido.

CLUTTER: objetivos que no son de interés en un radar. Las principales fuentes de *clutter* en la mayoría de aplicaciones de radar son el suelo y la superficie del mar, las precipitaciones, las aves y los insectos (Barton & Leonov, 1998).

DVOR: acrónimo en inglés para designar el *VOR Doppler*, el cual es un instrumento de radio ayuda a la navegación aérea que presenta mayor precisión que el sistema radio ayuda VOR.

MATLAB®: es un lenguaje y entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización y la programación, allí es posible analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos o aplicaciones.

RADAR: sistema que utiliza radiaciones electromagnéticas reflejadas por un objeto para determinar la localización o velocidad de éste.

RADAR BIESTÁTICO: radar cuya antena emisora es distinta a la antena receptora.

RADAR MONOESTÁTICO: radar cuya antena opera como emisora y receptora.

RADAR PRIMARIO PSR: radar que identifica objetos detectando las reflexiones que se producen en la superficie de los mismos. Al contrario del radar secundario o SSR, que permite la identificación y seguimiento de blancos específicos en el espacio.

RCS: véase SECCIÓN TRANSVERSAL DE RADAR.

RCS BIESTÁTICA: RCS medida por medio de un radar biestático.

RCS MONOESTÁTICA: RCS medida por medio de un radar monoestático.

SECCIÓN TRANSVERSAL DE RADAR (RCS): medida de la energía electromagnética que un blanco dispersa en una cierta dirección normalizada hacia una antena receptora respecto a la densidad de la onda incidente de un radar que lo ha iluminado.

VOR: Acrónimo en inglés para la frase *VHF Omnidirectional Radio Range*, que en castellano significa Radiofaro Omnidireccional de muy alta frecuencia. Es la designación de una radio ayuda a la navegación utilizada por las aeronaves para seguir en vuelo una ruta preestablecida.

INTRODUCCIÓN

Las señales no deseadas en un radar de operaciones de navegación aérea son una carga de trabajo extra para los controladores aéreos (ATC) y como consecuencia pueden afectar a la seguridad de los vuelos. En este estudio se analiza la Sección Transversal de Radar (RCS) de objetos simples por medio de un algoritmo computacional como parámetro inicial para identificar aquellos obstáculos que pueden generar blancos falsos por reflexión de las respuestas recibidas en el radar, como lo son por ejemplo, las interferencias emitidas por aerogeneradores cercanos a zonas de operación aérea.

En los últimos años, la industria aeronáutica y naval ha venido estudiando en gran medida la RCS y en conjunto con algunas universidades del exterior, se han hecho grandes esfuerzos para encontrar los programas más adecuados para el modelado de la RCS tanto en barcos como en aeronaves.

Para los ATC también son muy importantes los resultados obtenidos por medio de la medición de la RCS porque permite discrepar entre una aeronave y un obstáculo, debido a que en los radares se puede visualizar la información de ambos elementos. Mediante el estudio de la RCS y la adecuación de un programa que pueda predecirla para objetos simples se pretende ser capaz de identificar aquellos elementos que por ser eléctricamente significativos (RCS elevada) pueden provocar reflexiones en las respuestas de las aeronaves y que el radar genere blancos falsos.

En aviación, el problema de los obstáculos estáticos se encuentra resuelto mediante la eliminación de los mismos en las imágenes de radar; sin embargo, los obstáculos móviles aún se presentan como un inconveniente. En la actualidad se ha incrementado el número de parques eólicos, así como el tamaño de los aerogeneradores, lo que ha degradado en muchos casos la calidad de los sistemas de telecomunicaciones y demás, que puedan ser afectados por este tipo de parques. Por esta razón se deben desarrollar herramientas eficientes que permitan calcular dicha influencia (Rodríguez. Olatz, et al., 2010). Este proyecto de grado proporciona el diseño de un programa básico para el estudio de la RCS de objetos circundantes a un aeropuerto y, aunque es un programa que evalúa en forma general dos tipos de obstáculos, se enfoca finalmente en la evaluación de aerogeneradores que pueden ser instalados dentro de un aeropuerto o en sus alrededores.

OBJETIVOS

GENERAL

Realizar el cálculo de la RCS biestática de objetos simples como un cilindro y una placa plana.

ESPECÍFICOS

Estudiar los modelos y algoritmos necesarios para calcular la RCS de cuerpos simples.

Desarrollar la herramienta computacional necesaria para realizar el cálculo de la RCS de cuerpos simples.

Implementar la herramienta computacional desarrollada en el objetivo anterior para simular y calcular la RCS de formas simples.

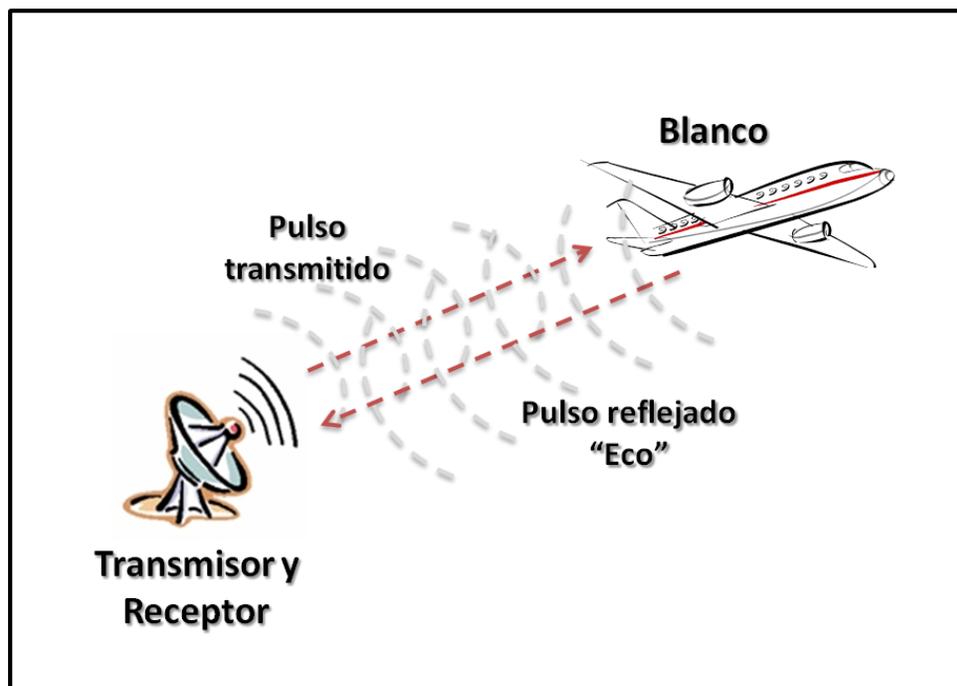
1. FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE EL RADAR

1.1. FUNCIONAMIENTO DEL RADAR

El Radar "*Radio Detection and Ranging*" fue inicialmente desarrollado para reemplazar la detección visual de blancos por varias razones. Las ondas de radio sufren muchas menos atenuaciones a través de la atmósfera que las ondas de luz, de esta manera pueden detectarse blancos antes de que estos sean visibles ópticamente. Además, estos también trabajan en la noche, donde la iluminación del ambiente puede ser muy poca y no es posible visualizar el blanco (Knott, Tuley, & Shaeffer, 2004).

El Radar es un sensor electromagnético para la detección y localización de objetos reflectantes. Esta operación se resume en los siguientes pasos y ayudados por la figura 1:

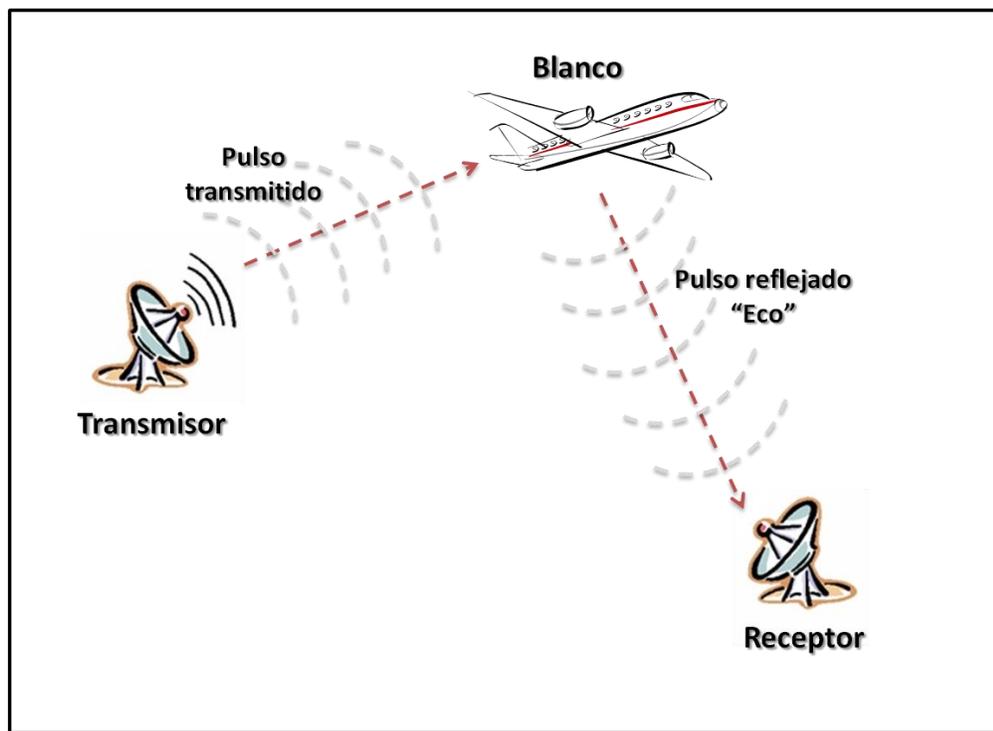
Figura 1. Radar monoestático



- I. El radar irradia energía electromagnética desde una antena, la cual es propagada en el espacio.
- II. Alguna parte de la energía irradiada es interceptada por un objeto reflectante o blanco, localizado a una distancia determinada del radar.
- III. La energía interceptada por el blanco es re-irradiada en muchas direcciones.
- IV. Alguna de la energía re-irradiada (eco) es retornada y recibida por la antena del radar.
- V. Después de la amplificación por un receptor y con la ayuda del procesamiento adecuado de la señal, se toma una decisión en la salida del receptor en cuanto a la señal de eco del blanco. En ese momento, se encuentra la ubicación de destino y posiblemente otra información sobre el blanco.

En el caso biestático la energía re-irradiada por el blanco y la cual está en la dirección del receptor, es recibida por el mismo. Ya que el receptor se encuentra en una ubicación arbitraria diferente a la del transmisor, el sistema se convierte en el tipo biestático.

Figura 2. Radar biestático



Para maximizar la sensibilidad del sistema y reducir la interferencia debido a las señales no deseadas o ecos, se suelen emitir períodos de corta duración o pulsos de energía de radio frecuencia (RF) (Knott, Tuley, & Shaeffer, 2004).

La ecuación del radar es útil para determinar el rango máximo al que un radar determinado puede detectar un objetivo, a la vez que puede servir como un medio para la comprensión de los factores que afectan el rendimiento de un radar. La forma más simple de la ecuación de radar es la dada por:

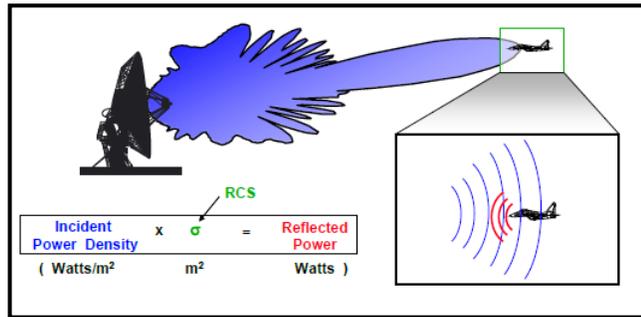
$$P_r = \left(\frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \right) \left(\frac{\sigma}{4\pi R^2} \right) \left(\frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \right) \quad (1)$$

Donde P_r es la potencia recibida por el radar in watts, P_t es la potencia que sale del transmisor en watts, G_t la ganancia de la antena transmisora, G_r la ganancia de la antena receptora, σ la sección transversal de radar del blanco en m^2 , λ la longitud de onda de la frecuencia de operación del radar en metros y R el rango entre el radar y el blanco en metros. Debe notarse que el primer término entre paréntesis representa la densidad de potencia de radar en el objetivo ($watts/m^2$). El producto del primer término y el segundo término entre paréntesis representa la densidad de potencia en el receptor del radar debido a la reflexión o dispersión que se produce en el objetivo. El tercer término entre paréntesis representa la cantidad de potencia reflejada capturada por la apertura de la antena receptora (Chatzigeorgiadis, 2004).

1.2. RADAR BIESTÁTICO

Cuando un radar irradia energía que impacta sobre un objeto, *incident power density* en la Figura 3, la superficie de este último irradia energía electromagnética en todas las direcciones (*relected power*). Esta energía es proporcional a la dimensión del objeto, su orientación, forma y propiedades del material del que está compuesto. La reflexión que depende de dichas variables, se puede expresar por medio de un sólo parámetro denominado Sección Transversal de Radar, *RCS* (σ) para la misma figura.

Figura 3. Representación de la medición de la RCS.

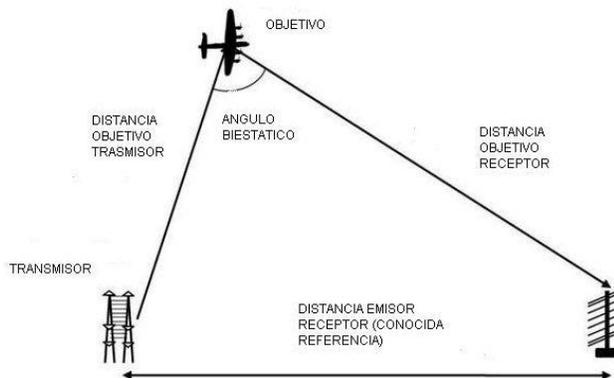


Fuente:

http://aess.cs.unh.edu/Radar%202010%20PDFs/Radar%202009%20A%20_1%20Introduction.pdf [Fecha de búsqueda: 10 de abril de 2012]

Un radar biestático es un radar cuya antena transmisora y receptora se encuentran distanciadas entre sí, en contraposición al radar monoestático, cuya antena de transmisión y recepción es la misma. Si la RCS se mide por medio de un radar monoestático, entonces se dice que por medio de este se obtiene o se mide la RCS monoestática del objetivo o blanco. Si en contraposición, la RCS se mide por medio de un radar biestático, entonces se dice que se mide la RCS biestática, y el ángulo que se genera entre el haz de iluminación (emisión del transmisor al blanco) y el haz emitido del blanco al receptor, véase el esquema de la Figura 4, se le denomina ángulo biestático y se representa con el símbolo β .

Figura 4. Esquema de representación del ángulo biestático



Fuente: <http://1y2gm.foroactivo.com/t2281p30-la-herencia-tecnologica-alemana> [Fecha de búsqueda: 24 de julio de 2013]

1.3. BANDAS DE FRECUENCIA

En la manipulación de radares se utilizan diferentes bandas de frecuencia en función de su uso. A continuación podemos ver una tabla con los diferentes márgenes de frecuencia en los que pueden trabajar los radares, véase Tabla 1.

La banda de frecuencia escogida para el funcionamiento del radar influye directamente en sus características de funcionamiento y diseño, así como en sus cualidades para el posterior funcionamiento y sus aplicaciones (Martí & Galera, 2009). Los radares están limitados a un segmento relativamente estrecho del espectro electromagnético por razones de disponibilidad de los componentes, efectos de propagación, requerimientos angulares de resolución, características de dispersión del blanco, regulaciones internacionales y otras preocupaciones relevantes.

Tabla 1. Designación estándar IEEE para bandas de radio frecuencia

DESIGNACION DE BANDA	RANGO DE FRECUENCIA (GHz)	LONGITUD DE ONDA (cm)
UHF	0.3 - 1.0	30 -100
L	1.0 - 2.0	15 -30
S	2.0 - 4.0	7.5 - 15
C	4.0 - 8.0	3.75 - 7.5
X	8.0 - 12.0	2.5 - 3.75
K _u	12.0 - 18.0	1.67 - 2.5
K	18.0 - 27.0	1.11 - 1.67
K _a	27.0 - 40.0	0.75 - 1.11
milimétrica	40.0 - 300.0	0.1 - 0.75

Fuente: (Díaz, 2005)

ANTECEDENTES DEL RADAR Y LA RCS COMO HERRAMIENTAS DE DETECCIÓN

Los principales eventos relacionados al desarrollo del radar ocurren así:

El físico alemán Heinrich Hertz descubre a finales del siglo XIX que las ondas electromagnéticas poseen las mismas propiedades que las ondas luminosas, por lo cual concluye que dichas ondas podían reflejarse.

En 1901 Guglielmo Marconi mostrado en la figura 5, logró hacer una recepción de telégrafo a través del atlántico luego de que se le acreditara la patente como el creador de la radio, o el telégrafo sin hilos. Posteriormente construyó toda una red de estaciones de radio, las cuales se usaban principalmente para dos propósitos, entretenimiento (por medio de la radio) y navegación marítima.

Estos adelantos significaron las principales motivaciones a nivel de estrategia militar para intentar detectar barcos y aviones a principios de los años 30, ya que, desde un marco en el que la Alemania Nazi aumentaba su poder militar y había transcurrido ya la primera guerra mundial, algunos países de la región europea buscaban estrategias de defensa, como es el caso del Reino Unido, quien bajo un comité científico del cual formaba parte el escocés Robert Watson-Watt (quien había realizado avances en la radiodetección de tormentas) demostró por medio de una prueba práctica el 25 de febrero de 1935 que podía registrar el eco de la señal radioeléctrica emitida por una antena de la BBC al paso de un avión de la Real Fuerza Aérea Británica. En la figura 6 se puede apreciar a éste dando una explicación del funcionamiento del mismo.

Gracias a estas técnicas hoy en día al radar es usado en tareas importantes como la navegación aérea y marítima por medio de radio ayudas, las telecomunicaciones y sistemas de entretenimiento (la radio), la cartografía satelital, la meteorología (en la figura 7 se puede apreciar el registro de un frente de tormenta reconocido por un radar meteorológico) y el control de tránsito vehicular. En este último caso, se aplica un principio conocido como “Efecto Doppler”, fenómeno denominado así por el científico austriaco Christian Andreas Doppler y que consiste en el cambio aparente de la longitud de onda de la señal emisora al ésta retornar como eco a medida que un objeto en movimiento se acerca hacia la fuente de la señal o se aleja de esta. Dicho cambio es función de la velocidad del objeto que se mueve, por lo cual, debido a que se conoce la

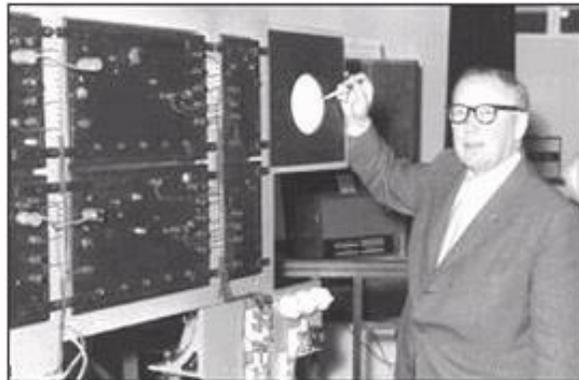
velocidad de la fuente emisora únicamente, se mide el cambio de la longitud de onda de la misma al rebotar en el objeto, determinando así la velocidad de este último.

Figura 5. Guglielmo Marconi con el teléfono sin hilos



*Fuente: <http://telecomunicaciones-grupo1.blogspot.com/>
[Fecha de búsqueda: 10 de abril de 2012]*

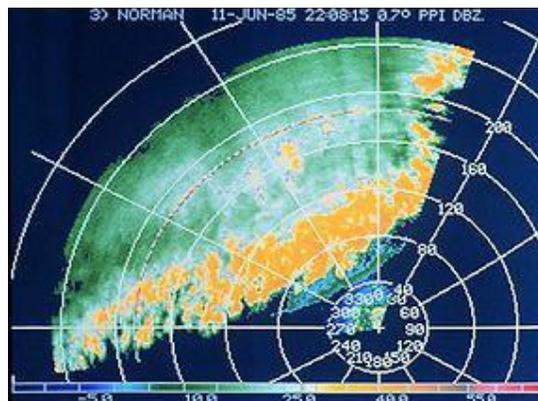
Figura 6. Sir Robert Watson Watt con radar de la época



*Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos43/tarjeta-circuito-integrado/tarjeta-circuito-integrado.shtml>
[Fecha de búsqueda: 10 de abril de 2012]*

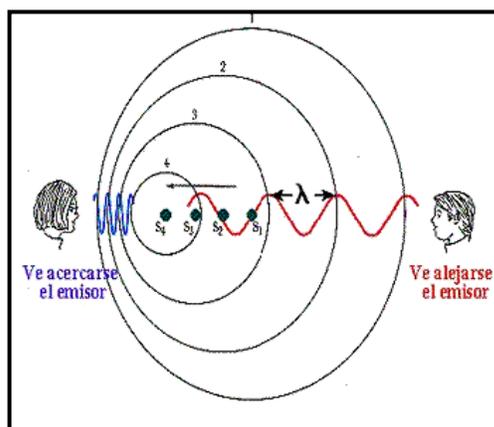
Las medidas también pueden hacerse si la fuente emisora es la que está en movimiento, tal como se puede apreciar en la Figura 8, donde se representa gráficamente como percibe un receptor la longitud de onda a medida que la fuente emisora se acerca o se aleja de éste.

Figura 7. Frente de tormenta apreciada bidimensionalmente por un radar meteorológico



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Radar_meteorológico
[Fecha de búsqueda: 20 de abril de 2012]

Figura 8. Representación gráfica del “Efecto Doppler” en términos de la longitud de onda

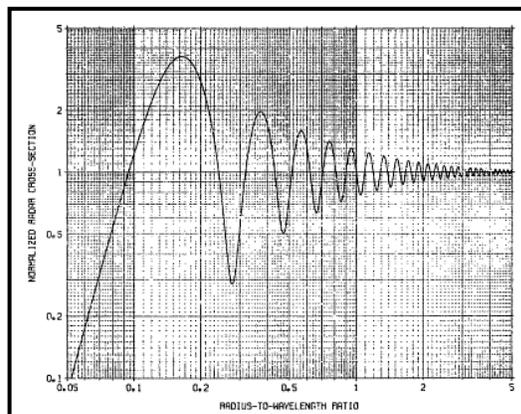


Fuente: http://www.arandurape.edu.py/Ministerio_de_espana/Antares/modulo2/m2_u204.html [Fecha de búsqueda: 18 de abril de 2012]

En 1972 el Laboratorio de Investigación Naval de Washington D.C., presentó un reporte llamado *Calculation of the Radar Cross of a Perfectly Conducting Sphere* (Blake, 1972) donde desarrolló un programa escrito en Fortran en el cual se calcula la sección recta radar de una esfera metálica la cual es usada como objetivo estándar que permite calibrar en un radar las medidas de la sección transversal de radar. Los resultados de dicha calibración se presentaban gráficamente tal como se puede apreciar en la Figura 9 donde se muestra la curva de la RCS normalizada de una esfera de conducción perfecta en función de la relación *radio/longitud de onda*, donde la RCS normalizada es simplemente la sección transversal de radar en relación al área de la esfera.

En 1991 se presenta en la Universidad de Cataluña la tesis doctoral “Sección Recta de Blancos Radar Complejos en Tiempo Real”¹. Aquí se definen claramente distintos métodos de predicción de la RCS los cuales se dividen en tres grandes grupos: métodos de baja frecuencia, métodos de alta frecuencia y nuevos métodos. Aunque el desarrollo de este trabajo se centra en los dos últimos métodos debido a las características de los objetivos propuestos, se presentan de manera precisa el origen de los diferentes métodos, los cuales servirán como base teórica para uno de los objetivos propuestos en este trabajo.

Figura 9. Sección recta radar normalizada de una esfera conductora perfecta en función de la relación radio/longitud de onda.



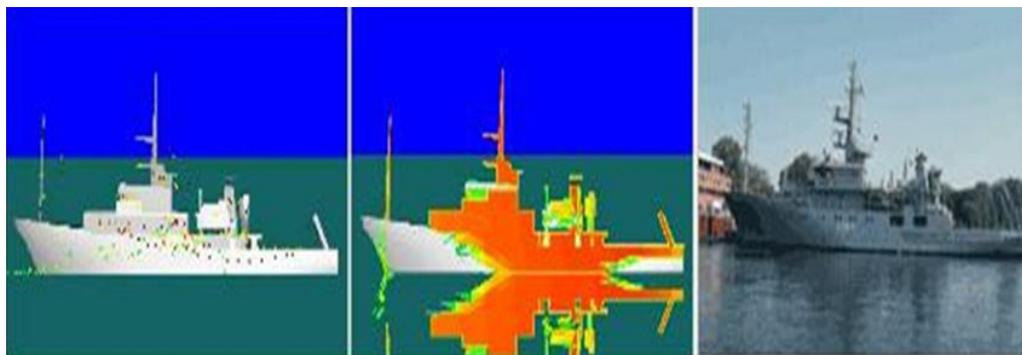
Fuente: (Blake, 1972)

¹ La Sección Transversal de Radar (RCS) es llamada también Sección Recta Radar

En el año 2005 el Instituto Politécnico Nacional de Tijuana-México, por medio de su Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital aprueba la tesis de Maestría “Modelado de un Radar Doppler de Pulsos (PDR)” en la que se modelan y aprueban algoritmos para la obtención de la posición y velocidad de un blanco. En este trabajo, a pesar que no se centran en el desarrollo de códigos para la RCS, se formaliza la ecuación que define la RCS, los valores típicos de la misma con relación a los objetivos, los métodos de predicción usados por la RCS y se determinan además, las ecuaciones de RCS para dos objetos simples, un cilindro y un cono truncado.

Por medio del artículo “Análisis de Métodos de Evaluación de la Sección Transversal de Radar y de los Parámetros que Inciden en Ella para Buques de Superficie” (Díaz & Gómez, 2011) se presenta un análisis por parte de la empresa colombiana fabricante de buques COTECMAR en el que se estudian las incidencias de la sección transversal de radar y los parámetros que influyen en esta para buques de superficie. Durante el trabajo se realiza una evaluación de dos herramientas que utilizan diversos métodos de modelado para la predicción de la RCS de buques de superficie, realizando modificaciones virtuales a buques ya fabricados por la empresa con el fin de proponer una metodología de diseño y optimización de buques de guerra de la Armada Nacional de Colombia. En la Figura 10 se puede apreciar una muestra del modelo de un buque de la Armada Nacional de Colombia visualizando la RCS del mismo con uno de las plataformas estudiadas para el cálculo de ésta.

Figura 10. Muestra de modelo en 3D de buque de la Armada Nacional de Colombia visualizando la RCS del mismo



Fuente: (Díaz & Gómez, 2011)

3. IMPORTANCIA DE LA PREDICCIÓN Y MEDICIÓN DE LA RCS EN LA INDUSTRIA AÉREA & ALGUNOS ESTUDIOS

El presente capítulo tiene como objetivo evidenciar la importancia de la predicción de la RCS en la industria aérea y apreciar que la mayor parte de los sistemas radar usan la RCS como herramienta para discriminar blancos, de aquí que diseñar y desarrollar algoritmos que permitan predecir esta de manera exacta sea crítica para su identificación, medición y desarrollo de técnicas de reducción de la misma.

- **AENA Aeropuertos**, empresa líder en la operación de aeropuertos en España y participante importante en la operación de 27 aeropuertos en el resto del mundo, tiene como objetivo actual certificar el primer “Aeropuerto Verde”, concepto que se refiere a la operación de un aeropuerto como neutro en emisión de carbono. Para ello, está realizando en el aeropuerto de Lanzarote (España) proyectos particulares que permitan utilizar de la forma más eficientemente posible los recursos naturales disponibles, permitiendo reducir los consumos y favorecer la producción de energía con fuentes renovables. Dentro de sus proyectos se encuentra la generación de energía por medio del montaje de celdas fotovoltaicas, centrales de biomasa, instalación de dispositivos LED en las luces de superficie en pista y la optimización los recorridos de las aeronaves en plataforma, y por supuesto, el uso de aerogeneradores, entre otros.

Estas pruebas, servirán para evaluar cuales tecnologías son viables de integrar a la red de aeropuertos que opera AENA Aeropuertos, de tal forma que se pueda garantizar la seguridad y operatividad de los aeropuertos. Una de estas propuestas, ya se está implementando en los aeropuertos de Madrid-Barajas, Barcelona-El Prat y por supuesto, Lanzarote, y es el uso de vehículos eléctricos para la movilización en plataforma, tal como se puede ver en la figura 11. Otra, como lo es la implementación de aerogeneradores, ya se está probando en el aeropuerto de La Palma en España, ver la figura 12. Estos y otros avances, tienen como objetivo hacer en uno solo, Lanzarote, el primer “Aeropuerto Verde” del mundo.

Figura 11. Implementación de vehículos eléctricos en operaciones de plataforma aeroportuaria.



Fuente: <http://fiturblog.com/2011/11/aena-llega-a-fitur-2012-con-innovaciones-en-sus-aeropuertos/> [Fecha de búsqueda: 20 de abril de 2012]

Figura 12. Aerogenerador en el aeropuerto de La Palma-España



Fuente: <http://www.concienciaeco.com/2012/01/24/qu-es-un-aeropuerto-verde/> [Fecha de búsqueda: 20 de abril de 2012]

- Mediante el trabajo “Análisis de la influencia de los parques eólicos en la propagación de ondas electromagnéticas, y en la prestación de servicio de

sistemas terrenales de radio-navegación aérea cercanos” (Otermin. Etayo, 2007), se evidencia que los aerogeneradores generan interferencias sobre los sistemas de radio navegación debido a la reflexión variable de las palas durante el tiempo de rotación. Dicha conclusión se realizó por medio de medidas de campo sobre radares, sistemas VOR, DVOR mostrados en la figura 14 y Radar Primario-PSR y, su comparación con algoritmos de predicción de RCS. Este estudio se realizó bajo la instrumentación de un sistema radar biestático, como se muestra en la siguiente figura:

Figura 13. Antena Transmisora y Receptora para medición de RCS sobre un Aerogenerador



Fuente: (Otermin. Etayo, 2007, pág. 6)

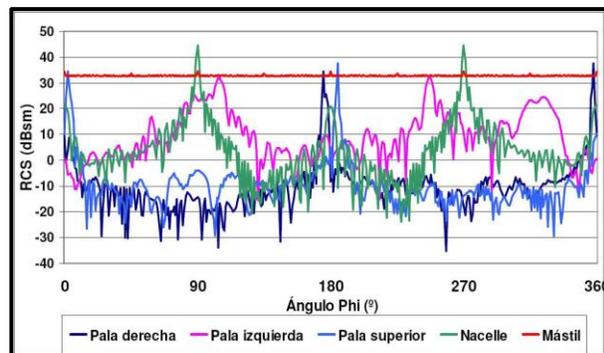
Figura 14. DVOR en El Perdón (Navarra).



Fuente: (Otermin. Etayo, 2007, pág. 7)

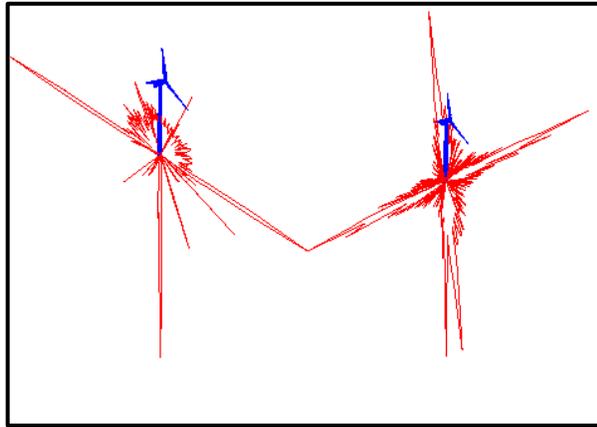
- Los autores de “*Caracterización de la Sección Radar de Aerogeneradores*” (Rodríguez. Olatz, et al., 2010) aplican el modelo de óptica física para predecir, medir y analizar la RCS de un aerogenerador parametrizado. Éste analiza sus partes por separado en función de un ángulo de un sistema coordinado propuesto. Dicho estudio lo realiza para mediciones monoestáticas y biestáticas por medio de la herramienta computacional usada y obtiene imágenes del comportamiento de la señal reflejada alrededor del blanco, dichas mediciones se muestran en la figura 16. Se concluye que la RCS máxima para cada parte varía en función de la frecuencia y la posición de evaluación.

Figura 15. RCS de las diferentes partes de un aerogenerador.



Fuente: (Rodríguez. Olatz, et al., 2010, pág. 2)

**Figura 16. Cortes en vertical en la simulación de la RCS del aerogenerador a
5.64 GHz**



Fuente: (Rodríguez. Olatz, et al., 2010, pág. 2)

4. SECCIÓN TRANSVERSAL DE RADAR – CONCEPTOS TÉCNICOS

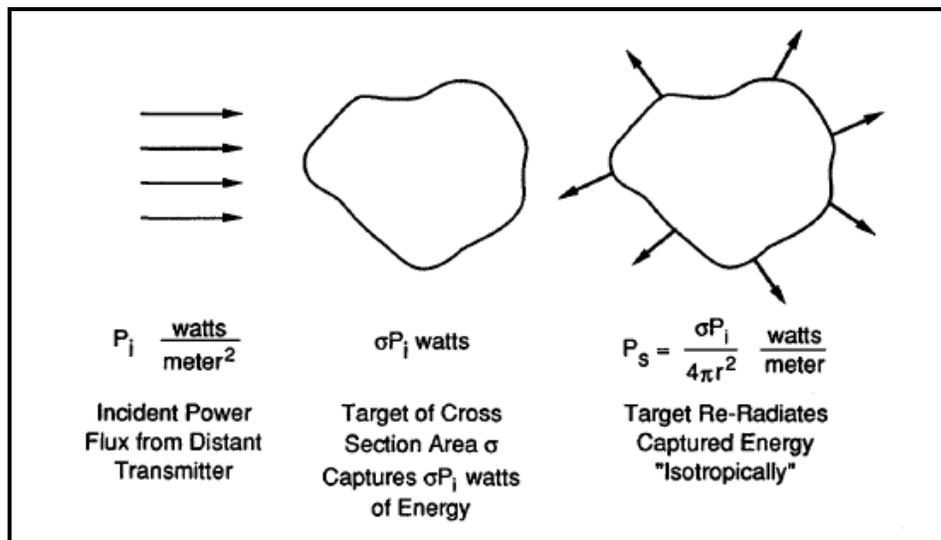
4.1. DEFINICIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE RADAR

Cuando las ondas electromagnéticas interactúan sobre un blanco son dispersadas en todas las direcciones. La medida del campo electromagnético dispersado a una distancia determinada se conoce como Sección Transversal de Radar, abreviadamente RCS. La RCS puede definirse como una comparación entre la potencia del campo reflejado por un blanco que se dirige al radar, con la potencia del campo reflejado que tendría una esfera perfectamente lisa de área de 1 m^2 (Díaz, 2005). La RCS es una característica propia del blanco radar y depende tanto de los parámetros de la onda iluminante, es decir, frecuencia y dirección de incidencia, como de la forma, constitución y materiales del propio blanco (Casals, 1991). La definición más básica para la sección transversal de radar puede darse a partir de la ecuación de onda, la cual demuestra que la sección transversal de radar es una propiedad de un objeto de dispersión (blanco) que representa la magnitud de la señal de eco devuelto o enviado a un receptor de radar por este objetivo.

En general, la RCS depende de las direcciones de incidencia y observación. En los radares monoestáticos la dirección de observación es igual a la de incidencia, con sentido contrario (Casals, 1991). En los radares biestáticos la dirección de observación es arbitraria; situación a considerarse en el presente trabajo de grado.

Un radar detecta un blanco y algunas veces puede clasificarlo, sólo porque éste es identificado como una señal de eco. Las características del eco dependen en gran medida del tamaño de la superficie del blanco expuesta al haz del radar. La variación es pequeña para blancos eléctricamente pequeños pero cuando el blanco tiene muchos detalles en su superficie, la RCS es demasiado extensa de resolver. Por otra parte, planos individualmente curvados o doblemente curvados de blancos eléctricamente grandes dan lugar a diferentes características de eco.

Figura 17. Definición intuitiva para sección transversal de radar



Fuente: (Knott, Tuley, & Shaeffer, 2004, pág. 65)

La sección transversal de radar de ciertos blancos puede ser modificada hacia un valor deseado de acuerdo al blanco radar analizado mediante la aplicación de las siguientes técnicas (Knott, Tuley, & Shaeffer, 2004):

- Materiales absorbentes de radar
- Cancelación pasiva
- Cancelación activa
- Shaping²

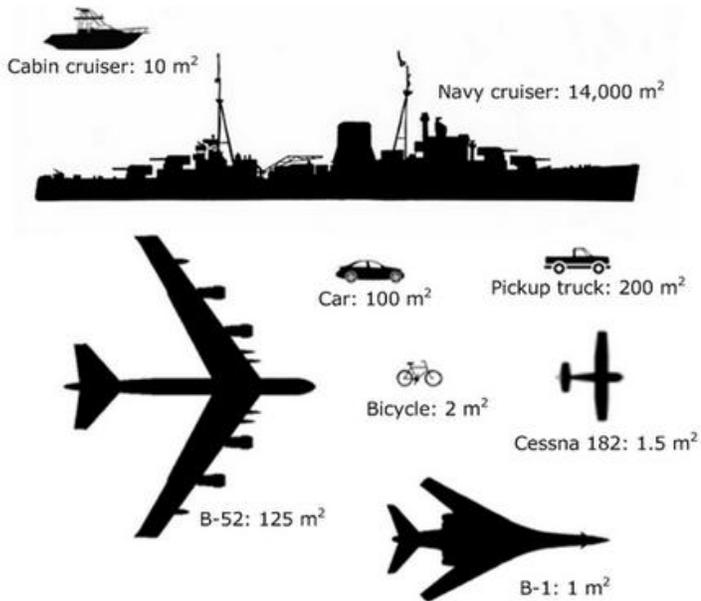
Para las aeronaves es de vital importancia el cálculo de la RCS en una fase de diseño temprana, ya que permite la disminución o aumento de dicha característica de acuerdo al tipo de aeronave diseñada. En cuanto a los aerogeneradores, la medición de la RCS permitirá analizar la influencia de estos sobre las imágenes de radar y así poder desarrollar herramientas que disminuyan dicha influencia

Las unidades para la RCS son m^2 . Esto no se refiere necesariamente al tamaño físico de un blanco. Si bien es cierto que grandes blancos tienen una RCS mayor, no todos los mecanismos de dispersión de RCS se relacionan con el tamaño.

² *Shaping* es la selección o el diseño de perfiles de superficie de modo que poca o ninguna energía sea reflejada de nuevo hacia el radar (Skolnik, 2008, pág. 14.2).

Valores típicos de RCS pueden estar en el intervalo de 10^{-5} m^2 para insectos a 10^{+6} m^2 para grandes buques. Algunos valores típicos de RCS para diferentes objetos se observan en la siguiente gráfica:

Figura 18. Valores de RCS para blancos típicos



Fuente: http://www.thehowlandcompany.com/radar_stealth/Bluefire.htm (Figura consultada el 22 de julio de 2013)

Además, algunos valores de RCS para diferentes modelos de aeronaves son:

Tabla 2. Valores de RCS para aeronaves específicas

Aeronave	RCS [m^2]
B-52	100
Blackjack	15
FB-111	7
F-4	6
MiG-21	4
MiG-29	3
Rafale-O	3
B-1B	0,75
B-2	0,3
F-117A	0,025

Debido al que los valores de RCS son dinámicos y en ocasiones muy bajos para expresarlos en m^2 , una escala de potencia logarítmica es a menudo más usada con el valor de referencia de $\sigma_{ref} = 1 m^2$ (Knott, Tuley, & Shaeffer, 2004):

$$\sigma_{dBsm} = \sigma_{dBm^2} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_{m^2}}{\sigma_{ref}} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_{m^2}}{1} \right) \quad (2)$$

La RCS es por lo tanto y fundamentalmente, una relación entre la densidad de potencia dispersada respecto a la densidad de potencia incidente. La potencia o intensidad de una onda electromagnética (EM) es proporcional al cuadrado del campo eléctrico o magnético, entonces la RCS puede ser expresada así:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_0|^2} \quad (3)$$

Donde E_0 es la fuerza del campo eléctrico de la onda incidente que incide sobre el blanco y E_s es la fuerza del campo eléctrico de la onda dispersada al radar. La expresión asume que un blanco extrae energía de una onda incidente y luego la irradia uniformemente en todas las direcciones. Aunque la gran mayoría de los blancos no dispersan la energía uniformemente en todas las direcciones, la definición asume esto. Esta suposición permite calcular la densidad de potencia dispersada sobre una superficie, donde R es típicamente tomado como el rango que existe desde el radar al blanco.

El proceso de límite de la ecuación (3) no siempre es un requerimiento absoluto. En la medición y análisis, el transmisor y el receptor del radar se encuentran generalmente ubicados en campos lejanos al objetivo, y en esa distancia, el campo dispersado E_s decae inversamente con la distancia R . Entonces, el término R^2 en el numerador de la ecuación (3), es cancelado por un R^2 implícito en el denominador. Consecuentemente, la dependencia de la RCS sobre la distancia R y la necesidad del límite, usualmente desaparece (Skolnik, 2008). Sin embargo, en el desarrollo de éste trabajo, las distancias transmisor-objeto y receptor-objeto serán tenidas en cuenta para obtener resultados más exactos y ubicaciones

aproximadas. Para el caso biestático así como para el caso de retro dispersión, se entiende que la distancia R se mide desde el blanco hasta el receptor.

4.2. MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE LA RCS

Debido a que la RCS depende de la frecuencia de la onda incidente, es necesario nombrar las tres regiones de frecuencia donde la RCS de un objetivo es diferente. Las regiones se definen basándose en el tamaño del objetivo en términos de la longitud de onda incidente. Para un objetivo suave de longitud L , las tres regiones de frecuencia son (Chatzigeorgiadis, 2004):

- **Rayleigh region: tamaño típico del cuerpo $< \lambda$:** A estas frecuencias la variación de fase de la onda plana incidente a través de la extensión del blanco es pequeña. Por lo tanto, la corriente inducida en el cuerpo del blanco es aproximadamente constante en amplitud y fase. La forma particular del cuerpo no es importante.
- **Resonance region: $\lambda < \text{tamaño típico del cuerpo} < 3\lambda$:** Para estas frecuencias, la variación de fase de las corrientes a través del cuerpo del blanco es significativa y todas las partes contribuyen a la dispersión.
- **Optic region: $3\lambda < \text{tamaño típico del cuerpo}$:** Para estas frecuencias hay muchos ciclos en la variación de fase de las corrientes a través del cuerpo del blanco y en consecuencia, el campo disperso será muy dependiente del ángulo.

La estimación de la RCS y los métodos computacionales dependen en gran medida sobre dónde en este grupo de medidas se encuentra nuestro blanco. Los métodos exactos son restrictivos a objetos simples o relativamente pequeños de la *Rayleigh region* y la *Resonance region*³, mientras los métodos aproximados han sido desarrollados para la *optic region*, también llamada región de alta frecuencia. Existen excepciones a estas limitaciones generales, dependiendo del método utilizado, aproximaciones de baja frecuencia pueden ser desarrolladas también en la *resonance region*.

³ En el libro Radar Cross Section el autor hace referencia a las dos regiones iniciales como una sola llamada Resonant region, cuyo intervalo se encuentra entre λ y 10λ .

4.2.1. Métodos analíticos o exactos

La RCS de cuerpos simples puede ser computada exactamente por una solución de la ecuación de onda en un sistema coordenado, para la cual, una coordenada constante coincide con la superficie del cuerpo:

$$\nabla^2 F + k^2 F = 0 \tag{4}$$

Donde F representa cualquier vector de campo eléctrico E o campo magnético H y, k es el número de onda. La ecuación anterior es una ecuación diferencial de segundo orden que puede ser resuelta como un problema de valores en la frontera donde los campos sobre la superficie del obstáculo de dispersión son especificados. La solución exacta requiere que los campos eléctricos y magnéticos justo adentro y justo afuera de la superficie satisfagan ciertas condiciones que dependen de las propiedades electromagnéticas del material de la superficie del cuerpo (Skolnik, 2008).

Esta solución analítica para la predicción de la RCS consiste en resolver las ecuaciones de Maxwell con las condiciones de contorno impuestas por la superficie del blanco (Casals, 1991). Método que requiere de la solución de ecuaciones diferenciales o integrales, que describen las ondas dispersadas del blanco, bajo unas condiciones de frontera específicas (Díaz, 2005). La ecuación (4) se puede satisfacer con cada una de las tres componentes del campo F . Si se representa cualquiera de los componentes del vector por una función V , entonces V es una solución a la ecuación de onda escalar:

$$\nabla^2 V + k^2 V = 0 \tag{5}$$

Para resolver esta ecuación usando separación de variables, se representa la función V en términos de otras tres funciones, cada una de las cuales depende solamente de una coordenada:

$$V(u_1, u_2, u_3) = V_1(u_1)V_2(u_2)V_3(u_3)$$

(6)

Donde u_1 , u_2 , u_3 representan las tres coordenadas. Estas podrían ser x , y , y z del sistema rectangular ó r , θ y φ del sistema esférico. La separación de variables se enfoca en resolver ecuaciones diferenciales parciales dando tres ecuaciones diferenciales ordinarias, donde cada una envuelve un par de constantes separadas. Estas constantes deben ser determinadas recurriendo a las condiciones de frontera del problema a resolver (Knott, Tuley, & Shaeffer, 2004).

Cuando se utiliza este método, la ecuación de onda da la solución exacta para los campos totales en cualquier parte del espacio, y típicamente el campo incidente es expandido en términos de ondas elementales en el sistema coordenado inicialmente usado. Cuando el campo disperso es normalizado al campo incidente, se eleva al cuadrado y luego se multiplica por el área de una esfera cuyo radio es la distancia al punto de observación, se obtiene la RCS.

Aunque las soluciones exactas son realizables, son a menudo difíciles de interpretar y de programar (Díaz M. A., 2005).

4.2.2. Métodos de baja frecuencia

Los métodos numéricos de baja frecuencia se plantean a partir de las ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial o a partir de ecuaciones integrales derivadas de las ecuaciones de Maxwell. Según el planteamiento utilizado se trata de métodos integrales o de diferencias finitas. Además puede plantearse un problema integro-diferencial que lleva al método de elementos finitos (Casals, 1991). Las ecuaciones electromagnéticas pueden formularse en el dominio del tiempo o de la frecuencia.

Aunque las soluciones analíticas se constituyen en ejercicios académicos interesantes y pueden en algunos casos describir los mecanismos de dispersión, estas no se ajustan a blancos tácticos, por lo que es necesario utilizar otro tipo de métodos. Además, la complejidad existente para resolver la RCS por medio de métodos analíticos para cuerpos complejos o eléctricamente grandes, hace necesario el uso de ordenadores para el cálculo numérico y de métodos que computen una aproximación del campo dispersado. En aplicaciones reales, estos métodos son prohibitivos al aplicarlos a cuerpos de gran tamaño, excepto para

radars de baja frecuencia, por esta razón, se le da este nombre a dichos métodos.

En la actualidad, el avance de la tecnología permite disponer de velocidades de cálculo cada vez más grandes, lo que ha posibilitado realizar cálculos que en el pasado sólo se podían llevar a cabo con superordenadores. Por este motivo, cada día aumenta el tamaño de los cuerpos que pueden ser analizados por este tipo de método, al igual que los esfuerzos por desarrollar herramientas que permitan llegar a dicho objetivo.

Un enfoque alternativo es la solución de ecuaciones integrales gobernadas por la distribución de los campos inducidos sobre la superficie del blanco. La aproximación más utilizada es una solución por medio del método de los momentos (MoM), en el cual, las ecuaciones integrales son reducidas a un sistema de ecuaciones lineales homogéneas. La razón para utilizar este método es que el perfil de superficie del cuerpo no tiene restricción, lo que permite el cálculo de la dispersión de cuerpos tácticos complejos. Otra razón es que métodos ordinarios de solución como inversión de matrices o eliminación gaussiana, pueden ser empleados para lograr una solución. Este tipo de métodos es limitado por memoria computacional y tiempo de ejecución (Skolnik, 2008).

- **Método de los momentos:** Las ecuaciones integrales formuladas a partir de las ecuaciones de Maxwell son exactas y válidas para cuerpos muy grandes o muy pequeños comparados con la longitud de onda (Knott, Tuley, & Shaeffer, 2004). En este tipo de métodos se destaca el método de momentos (MoM), el cual es muy similar al procedimiento Rayleigh Ritz para resolver ecuaciones integrales.

La formulación exacta calcula la influencia de cada parte del cuerpo con otra parte, por lo que todos los fenómenos electromagnéticos están incluidos: región especular, región final, difracción, rebote múltiple, *traveling*, *creeping*, entre otros.

El método de los momentos es la técnica más usada para resolver ecuaciones integrales. En el caso de la predicción de la RCS por medio del método de los momentos (MoM), las ecuaciones integrales se derivan de las ecuaciones de Maxwell y de las condiciones de frontera. El método de los momentos reduce las ecuaciones integrales a un conjunto de

ecuaciones lineales simultáneas que pueden ser resueltas utilizando álgebra matricial estándar. La mayoría de formulaciones en MoM requiere una discretización del cuerpo del blanco y por lo tanto, es compatible con el método de elementos finitos (Chatzigeorgiadis, 2004). En muchas ocasiones se utilizan ambos métodos en tándem para encontrar la RCS de un objetivo.

Este método provee una rigurosa solución del problema de predicción de la RCS, dando resultados muy exactos. Por este motivo, este método tiende a producir largas matrices, resultando en altos requerimientos computacionales e incrementando el tiempo de utilización de cualquier software. El MoM no es práctico para blancos grandes a altas frecuencias, debido entonces a limitaciones computacionales.

- **Método de elementos de contorno:** El método de los elementos de contorno (BEM) ha sido utilizado en ingeniería civil para el cálculo de estructuras y poco a poco se ha introducido para la solución del problema electromagnético. Se basa en las ecuaciones integrales de reciprocidad de Lorentz, las cuales están formuladas en términos de campos y no de corrientes. La discretización se realiza sobre superficies que separan regiones homogéneas, utilizando técnicas del método de elementos finitos (Casals, 1991).

Este método permite resolver un problema tridimensional homogéneo a trozos. Para esto, realiza un planteamiento de las ecuaciones integrales y de las condiciones de contorno. Luego se realiza una discretización superficial en celdillas bidimensionales.

Este método, es considerado por algunos autores como un caso específico del método de momentos, debido a la elección de las funciones base y peso.

- **Método de diferencias finitas:** Se basa en la discretización de las ecuaciones de Maxwell en forma diferencial utilizando la técnica de las diferencias finitas (Casals, 1991). Este problema puede ser planteado en el dominio del tiempo o de la frecuencia.

En este tipo de métodos debe asegurarse la condición de radiación que evita que el campo dispersado se refleje de nuevo hacia el objeto al alcanzar los límites de la región discretizada (Casals, 1991). A diferencia de los métodos integrales, los cuales implícitamente incluyen la condición anterior.

- **Método de elementos finitos:** El método de los elementos finitos (FEM) se ha utilizado en la solución de problemas mecánicos. Se basa en la definición de funciones integro-diferenciales, cuya minimización conduce a la solución del problema. Este método se trata de una técnica variacional.

La discretización del problema en el espacio requiere de un mallado tridimensional denominado elementos finitos, sobre los que se aplican de forma analítica y numérica los operadores diferenciales e integrales.

La aplicación del FEM requiere de la imposición de la componente de radiación, o la combinación de este método con el BEM, el cual, se aplica en la superficie del objeto y al ser un método integral lleva implícita la condición requerida. Las soluciones de ambos métodos se acoplan en la superficie que separa el problema externo del interno (Casals, 1991).

4.2.3. Métodos de alta frecuencia

Cuando las dimensiones características del objeto, como longitud, anchura y radios de curvatura de las superficies son grandes comparados con la longitud de onda, se aplican métodos de alta frecuencia. En este rango de banda, el obstáculo de dispersión debe ser por lo menos 5 longitudes de onda en tamaño, aunque pueden obtenerse resultados razonables para objetos más pequeños que esto (Knott, Tuley, & Shaeffer, 2004).

La simplicidad de los métodos de alta frecuencia se debe a que consideran la difracción como un fenómeno local: cada parte del blanco difracta los campos incidentes de forma independiente de los demás centros de difracción. De esta forma, pueden aproximarse los campos inducidos en una región del blanco como debidos únicamente al campo incidente, sin incluir el campo re-radiado por otras partes del mismo.

Dada la complejidad presentada en los métodos de baja frecuencia para el análisis de cuerpos eléctricamente grandes, es necesario utilizar métodos aproximados que requieran de un esfuerzo computacional relativamente menor para el cálculo de la RCS de cuerpos complejos. La región de alta frecuencia es de gran importancia, pues incluye la mayoría de los blancos radar de interés a las frecuencias más habituales (Casals, 1991).

- **Óptica geométrica:** La aproximación de óptica geométrica se basa en calcular la sección recta radar a partir del producto de los radios principales de curvatura de la superficie en los puntos de reflexión especular⁴ (Casals, 1991).

Este método analiza la propagación de la luz a frecuencias ópticas sin considerar la naturaleza ondulatoria de los campos electromagnéticos. Por esta razón, el método no es capaz de predecir la difracción en los obstáculos, sino únicamente la reflexión en superficies de curvatura suave y que obtenga siempre regiones de sombra con transiciones abruptas.

Para la predicción de la RCS, el método de óptica geométrica se basa en el concepto de los rayos reflejados por la superficie conductora según la ley de Snell (rayo incidente, reflejado y normal a la superficie en el mismo plano, con ángulos de incidencia y reflexión iguales). Por tanto, el método no podrá aplicarse a vértices ni aristas, en los que la normal a la superficie no está definida (Casals, 1991). Para la RCS biestática también es aplicable este método, siempre que la dirección de incidencia no se aleje excesivamente de la normal. Como la aproximación por óptica geométrica es independiente de la frecuencia, ésta sólo será aplicable cuando la longitud de onda es mucho menor que los radios de curvatura.

La dificultad del método aparece al intentar identificar el punto de reflexión especular y los radios de curvatura en ese punto. Por ello, el método no es utilizado para la solución de la RCS para objetos complejos ni es aplicable a superficies planas, cilíndricas o cónicas.

⁴ Reflexión especular: ocurre cuando la dirección de un rayo reflejado está en el plano perpendicular a la superficie reflectora que contiene al rayo incidente (Serway & Jewett, 2008).

- **Óptica física:** El método de óptica física (PO) estima la corriente inducida sobre la superficie de un cuerpo arbitrario debido a la radiación incidente. Los campos radiados se obtienen a partir de la solución de la ecuación integral de Stratton-Chu en campo lejano mediante la aproximación del plano tangente.

Las ecuaciones integrales de Stratton-Chu dan el campo dispersado por el obstáculo a partir del campo total sobre la superficie del mismo:

$$\vec{E} = \oint_s [-ik\eta(\hat{n} \times \vec{H})G + (\hat{n} \cdot \vec{E})\nabla G] ds \quad (7)$$

$$\vec{H} = \oint_s \left[ik\frac{1}{\eta}(\hat{n} \times \vec{E})G + (\hat{n} \times \vec{H}) \times \nabla G + (\hat{n} \cdot \vec{H})\nabla G \right] ds \quad (8)$$

Donde,

k: número de onda

\hat{n} : vector normal a la superficie

η : impedancia de la onda en el vacío

G: función de Green en el espacio libre

Estas ecuaciones son válidas para analizar la dispersión de una superficie cerrada, ya que si la superficie es abierta es necesario añadir integrales de superficie adicionales para limitar la superficie libre.

El método de óptica física permite hacer dos simplificaciones inmediatas, una de ellas es la aproximación en campo lejano, en el que la distancia R desde el objeto hasta el punto de observación es mucho mayor que cualquier dimensión del obstáculo. Bajo las condiciones de campo lejano, las integrales de línea de las ecuaciones anteriores pueden ser aproximadas como integrales de superficie; de allí resulta la otra simplificación, la cual propone que no habrá ninguna componente de la distribución del campo a lo largo de la dirección de dispersión de la superficie.

En el cálculo de objetos complejos en alta frecuencia las componentes de los campos dispersos pueden ser calculadas y añadidas antes de elevar al cuadrado para obtener la potencia dispersada. Así se mantendrá la relación de fase entre los distintos objetos de dispersión, de manera que los efectos de interferencia son correctamente representados (Knott, Tuley, & Shaeffer, 2004).

5. ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DE LA RCS BIESTÁTICA DE CUERPOS SIMPLES

5.1. RCS BIESTÁTICA DE UNA PLACA PLANA

Los cálculos matemáticos y algoritmos en Matlab⁵ para determinar la RCS biestática de la siguiente placa plana⁶ se realizan teniendo en cuenta las siguientes suposiciones:

- ❖ La placa plana es un disco circular de radio finito a medido en metros.
- ❖ El espesor del disco es de dimensión infinitesimal, lo cual lleva a suponer a la placa plana como un objeto de longitud cero.
- ❖ La placa tiene una superficie lisa (smooth), por lo tanto, el ángulo de incidencia ψ para el caso monoestático es igual a la mitad del ángulo biestático β .

5.1.1. Cálculo teórico

A continuación se presenta la ecuación para determinar la RCS biestática de un disco circular ubicado en el origen del espacio cartesiano (Pogemiller, Chu, & Gebre-Egziabher):

$$\sigma_{disc} = 16 * \pi * \left| \frac{A * \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) * J_1\left(k * d * \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right)}{\lambda * k * d * \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} \right|^2 \quad (9)$$

Donde,

A: Área del círculo

β : Ángulo biestático

J_1 : Función de Bessel de orden uno

k: Número de onda

⁵ MATLAB® es un software de alto nivel con un entorno interactivo para el cálculo numérico, visualización y programación.

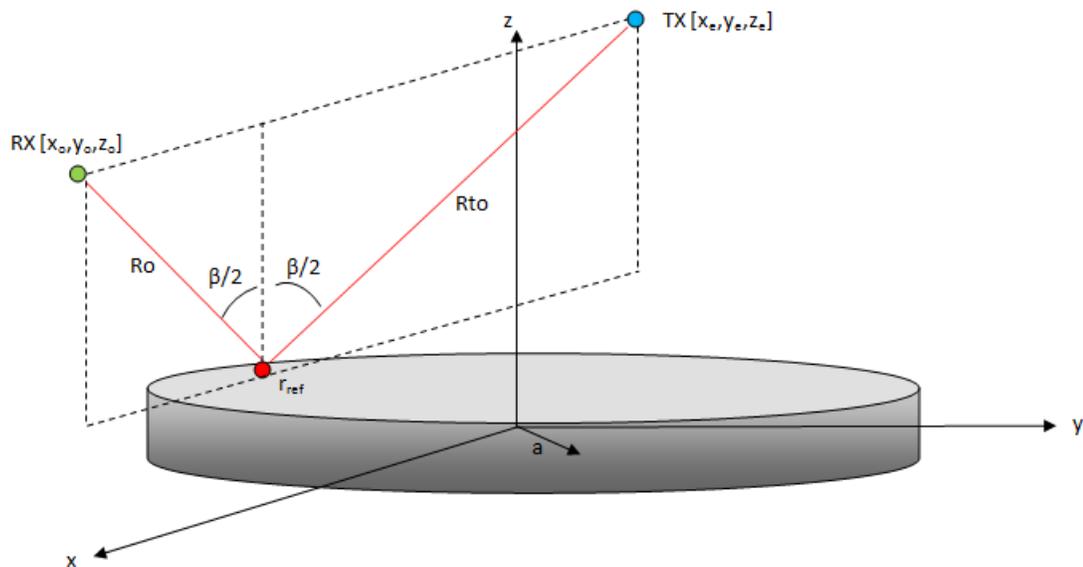
⁶ La placa plana circular será llamada como disco tanto en los cálculos matemáticos como en el algoritmo desarrollado en Matlab

d: diámetro del disco, es decir, $2 \cdot a$

λ : Longitud de onda

La ecuación (9) puede ser resuelta fácilmente teniendo los datos que satisfacen la ecuación, sin embargo, para mayor facilidad de estudio y observación se realizan cálculos geométricos para obtener las coordenadas cartesianas del TX y RX. Para determinar dichas coordenadas se tiene en cuenta la siguiente gráfica:

Figura 19. Relación entre coordenadas cartesianas y ángulo β , para el disco



Donde,

TX: transmisor con coordenadas $[x_e, y_e, z_e]$.

RX: receptor con coordenadas $[x_o, y_o, z_o]$.

R_{to} : vector posición desde el punto donde la onda emitida se refleja en la superficie del disco r_{ref} hasta el TX.

R_o : vector posición desde el punto donde la onda emitida se refleja en la superficie del disco r_{ref} hasta el RX.

r_{ref} : punto donde la onda emitida se refleja en la superficie del disco.

β : ángulo bistático.

Figura 20. Extracción del plano imaginario que contiene TX, RX y r_{ref}

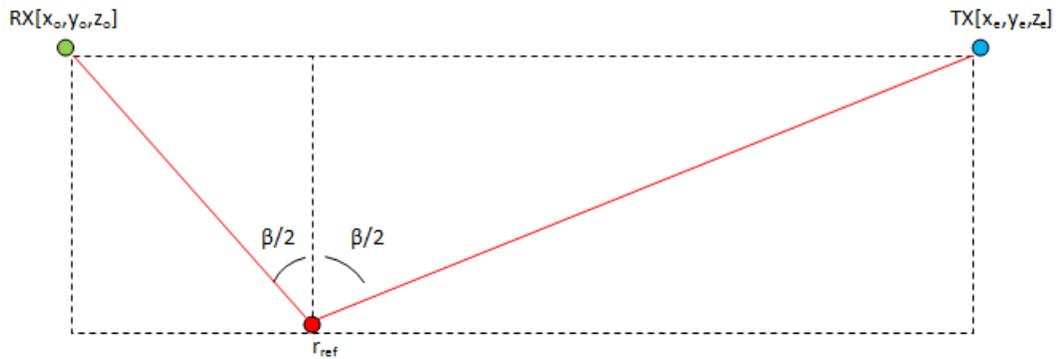
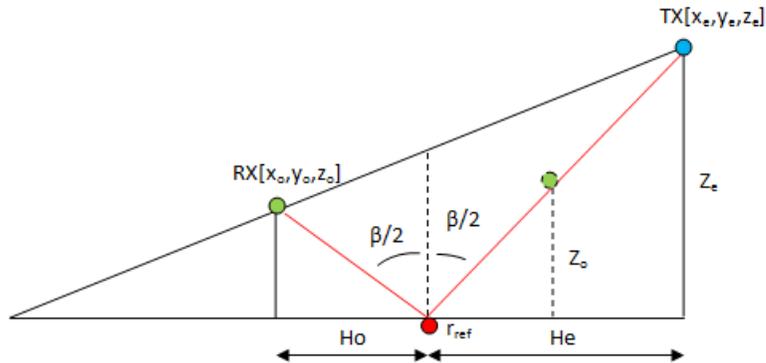


Figura 21. Triangulación y semejanza de triángulos para RCS del disco



La figura 20Figura 20. Extracción del plano imaginario que contiene TX, RX y r_{ref} expone el punto de ubicación del TX y el RX en un mismo plano imaginario, lo cual permite hallar las distancias H_e y H_o por medio de una triangulación que toma en cuenta además, el punto donde se refleja la onda sobre la superficie del disco r_{ref} . Dado que el ángulo entre el vector normal n y el vector Re es igual al ángulo entre

este vector normal y el vector R_o , se hace semejanza de triángulos para obtener la siguiente ecuación:

$$\frac{H_o}{H_e} = \frac{z_o}{z_e}$$

(10)

Además, con la ecuación (10) se obtiene un sistema de ecuaciones 2x2 que permite determinar las distancias H_o y H_e respectivamente:

$$H_o + H_e = \sqrt{(x_e - x_o)^2 + (y_e - y_o)^2}$$

(11)

El desarrollo comienza despejando la ecuación (10),

$$H_o = \frac{z_o}{z_e} H_e$$

(12)

Luego se reemplaza la ecuación (12) en la (11) obteniendo,

$$H_e + \frac{z_o}{z_e} H_e = \sqrt{(x_e - x_o)^2 + (y_e - y_o)^2}$$

(13)

$$H_e * \left(1 + \frac{z_o}{z_e}\right) = \sqrt{(x_e - x_o)^2 + (y_e - y_o)^2}$$

(14)

$$H_e = \frac{\sqrt{(x_e - x_o)^2 + (y_e - y_o)^2}}{1 + \frac{z_o}{z_e}} \quad (15)$$

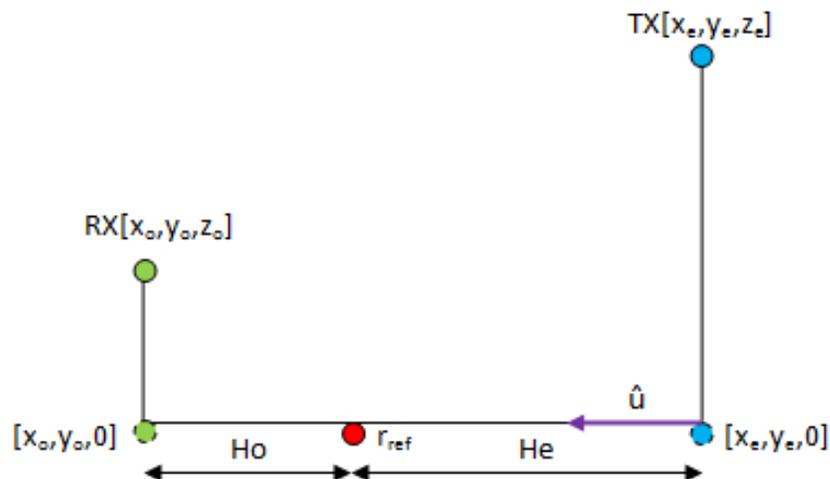
Finalmente se reemplaza la ecuación (15) en la (12) para encontrar la distancia H_o , así:

$$H_o = \frac{z_o}{z_e} * \frac{\sqrt{(x_e - x_o)^2 + (y_e - y_o)^2}}{1 + \frac{z_o}{z_e}} \quad (16)$$

$$H_o = \frac{z_o * \sqrt{(x_e - x_o)^2 + (y_e - y_o)^2}}{z_e + z_o} \quad (17)$$

Para encontrar las coordenadas del punto r_{ref} en el espacio, el punto RX y el TX se proyectan sobre el eje horizontal donde está ubicado el mismo y se determina un vector unitario \hat{u} , mostrado en la siguiente figura:

Figura 22. Proyección del punto RX y el TX sobre eje horizontal imaginario



Las coordenadas del vector \hat{u} serán:

$$\hat{u} = \frac{\langle x_o - x_e, y_o - y_e, 0 \rangle}{H_o + H_e} \quad (18)$$

$$\hat{u} = \frac{\langle x_o - x_e, y_o - y_e, 0 \rangle}{\sqrt{(x_e - x_o)^2 + (y_e - y_o)^2}} \quad (19)$$

Así, el punto r_{ref} será:

$$r_{ref} = \langle x_e, y_e, 0 \rangle + \hat{u} * H_e \quad (20)$$

Reemplazando las ecuaciones (15) y (19) en (20), tenemos:

$$r_{ref} = \langle x_e, y_e, 0 \rangle + \frac{\langle x_o - x_e, y_o - y_e, 0 \rangle}{\sqrt{(x_e - x_o)^2 + (y_e - y_o)^2}} * \frac{\sqrt{(x_e - x_o)^2 + (y_e - y_o)^2}}{1 + \frac{z_o}{z_e}} \quad (21)$$

$$r_{ref} = \langle x_e, y_e, 0 \rangle + \frac{\langle x_o - x_e, y_o - y_e, 0 \rangle}{1 + \frac{z_o}{z_e}} \quad (22)$$

$$r_{ref} = \frac{\langle x_o, y_o, 0 \rangle}{1 + \frac{z_o}{z_e}}$$

(23)

Para poder aplicar las coordenadas cartesianas encontradas anteriormente, el punto r_{ref} debe cumplir la condición:

$$r_{ref} \leq a$$

(24)

Con a : radio del disco

Así, si se cumple esta condición es posible calcular la RCS biestática para ese punto en la superficie del disco y si no se cumple, será porque esa parte del disco no está iluminada, por lo tanto, la RCS será cero.

Entonces, el $\beta/2$ será:

$$\frac{\beta}{2} = \cos^{-1} \left(\frac{\left[\langle x_e, y_e, z_e \rangle - \frac{\langle x_o, y_o, 0 \rangle}{1 + \frac{z_o}{z_e}} \right] \cdot \langle 0, 0, 1 \rangle}{\sqrt{\left(x_e - \frac{x_o}{1 + \frac{z_o}{z_e}} \right)^2 + \left(y_e - \frac{y_o}{1 + \frac{z_o}{z_e}} \right)^2 + (z_e - 0)^2}} \right)$$

(25)

$$\frac{\beta}{2} = \cos^{-1} \left(\frac{\left[\frac{\langle x_e - x_o, y_e - y_o, z_e \rangle}{1 + \frac{z_o}{z_e}} \right] \cdot \langle 0, 0, 1 \rangle}{\sqrt{\left(x_e - \frac{x_o}{1 + \frac{z_o}{z_e}} \right)^2 + \left(y_e - \frac{y_o}{1 + \frac{z_o}{z_e}} \right)^2 + (z_e)^2}} \right)$$

(26)

De esta manera, se reemplaza la ecuación (26) en la (9) para determinar la RCS de una placa plana circular cuando la reflexión de la onda se da sobre cualquier punto de su superficie, en función de las distancias del receptor y transmisor hasta un punto fijo en el espacio (origen).

5.1.2. Algoritmo en Matlab

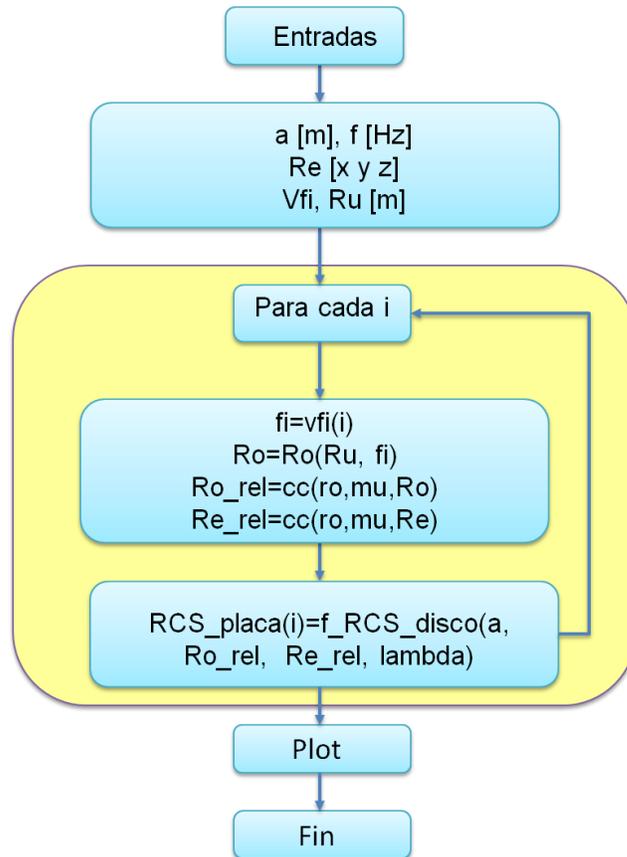
Para determinar la RCS del disco en Matlab se realizaron m-files⁷ diferentes, de los cuales hay dos funciones llamadas en momentos determinados durante el proceso de programación. El desarrollo de los algoritmos se presenta a continuación:

- **Algoritmo para determinar la RCS biestática del disco:**

A continuación se presenta el mapa del proceso del algoritmo programación para calcular la RCS biestática para un disco de longitud $L=0$, radio a y frecuencia f determinada.

⁷ Un archivo-m, o un archivo de secuencia de comandos, es un simple archivo de texto en el que puede colocar los comandos de MATLAB.

Figura 23. Diagrama de flujo del algoritmo para determinar la RCS del disco

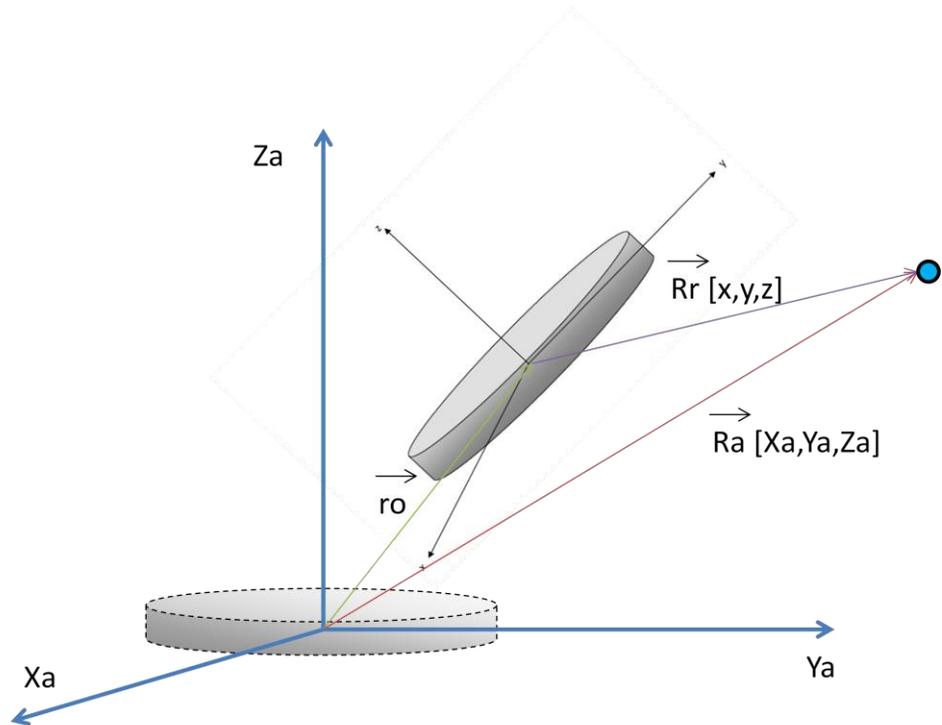


Donde además se desarrollan dos funciones adicionales, una para el cambio de coordenadas y otra para el cálculo de la RCS. Los mapas del proceso del algoritmo de programación para cada una se presentan en los puntos posteriores.

- **Algoritmo para cambio de coordenadas (rotación y traslación de objetos en el espacio):**

De acuerdo a la figura 24 se programa la función para el cambio de coordenadas:

Figura 24. Traslación y rotación del disco en el espacio



Donde,

X_a , Y_a , Z_a son las coordenadas absolutas en la ubicación inicial del objeto (disco).

x , y , z son las coordenadas relativas en la ubicación final del objeto (disco).

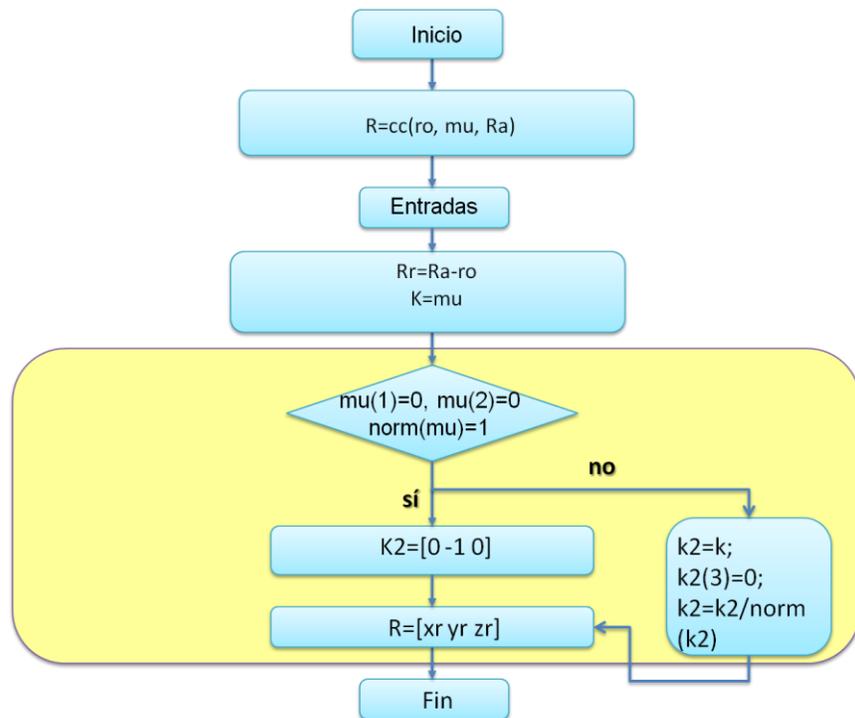
r_o es el vector posición desde el origen de las coordenadas absolutas hasta el origen de las coordenadas relativas, punto que es a la vez el centro del disco en la ubicación final.

R_a es el vector posición que va desde el origen de las coordenadas absolutas hasta un punto fijo de observación en el espacio.

R_r es el vector posición que va desde el punto de ubicación final del disco hasta el punto de observación fijo.

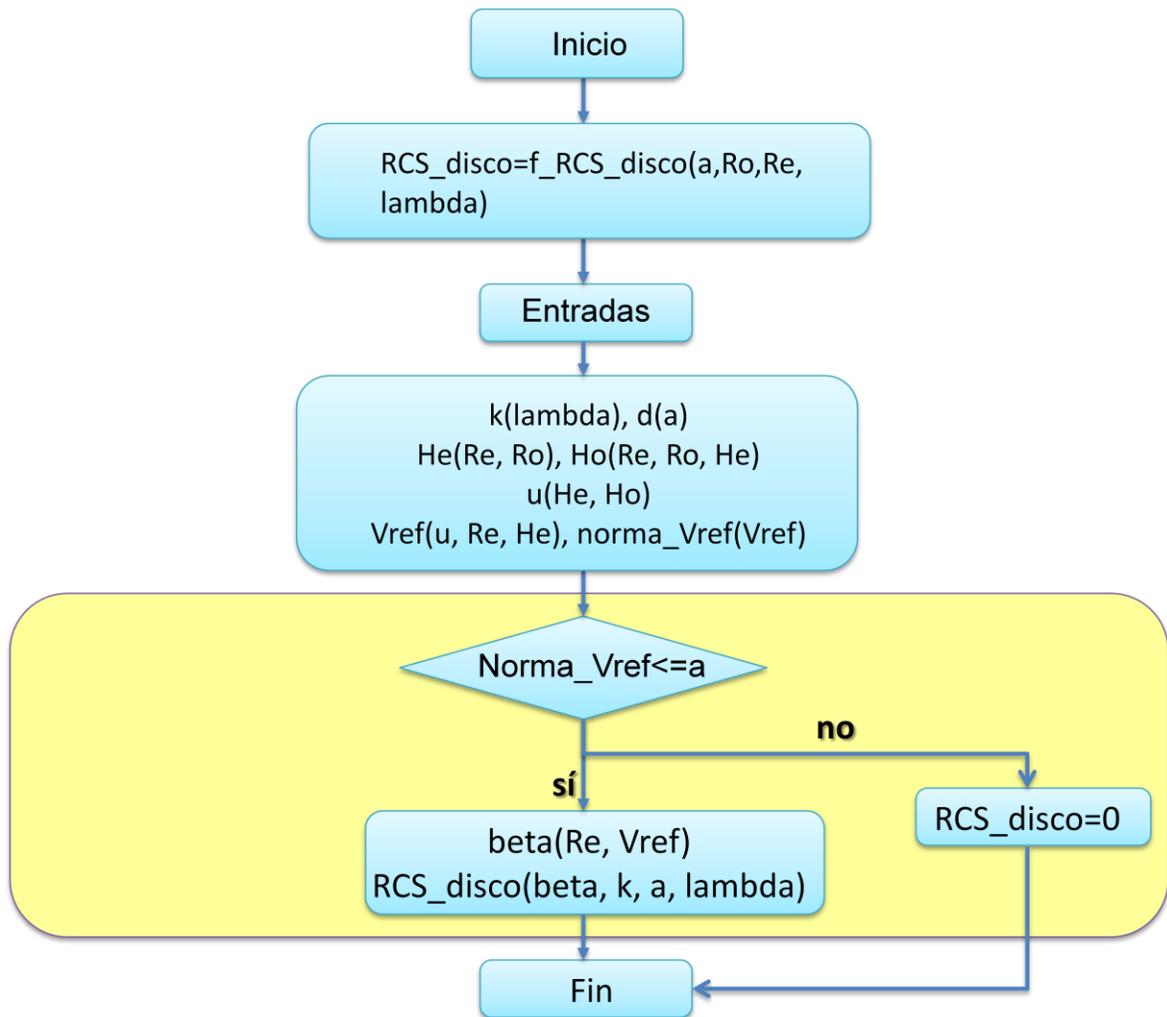
Así, con la gráfica anterior se desarrolla el siguiente algoritmo (véase algoritmo en Matlab en *anexo B*).

Figura 25. Diagrama de flujo para el algoritmo de cambio de coordenadas



- Función RCS_disco:

Figura 26. Diagrama de flujo para la función RCS_disco



5.2. RCS BIESTÁTICA DE UN CILINDRO

Los cálculos matemáticos y algoritmos en Matlab para determinar la RCS biestática del siguiente cilindro se realizan teniendo en cuenta las siguientes suposiciones:

- El cilindro para el cual se determina la RCS biestática es un cilindro circular.
- El cilindro tiene longitud finita L medido en metros.
- El cilindro tiene radio finito a medido en metros.
- El cilindro tiene una superficie lisa (smooth).

5.2.1. Cálculo teórico

A continuación se presenta la ecuación para determinar la RCS biestática de un cilindro circular cuyo centro se encuentra en el origen del espacio cartesiano (Pogemiller, Chu, & Gebre-Egziabher):

$$\sigma_{cylinder} = (\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s) = \frac{a^4 * \lambda * |e^{i*k*D*L} - 1|^2}{\pi * D^2 [(A^2 + B^2) * a^2]^{3/2}} * (G_1^2 + G_2^2 + G_3^2) \quad (27)$$

Donde,

$$G_1 = A * (a_y * \sin \theta_s * \sin \varphi_s + a_z * \cos \theta_s) - B * (a_x * \sin \theta_s * \sin \varphi_s) \quad (28)$$

$$G_2 = a_z * \sin \theta_s * (A * \cos \varphi_s + B * \sin \varphi_s) \quad (29)$$

$$G_3 = B * (a_x * \sin \theta_s * \cos \varphi_s + a_z * \cos \theta_s) - A * (a_y * \sin \theta_s * \sin \varphi_s) \quad (30)$$

$$A = \sin \theta_i * \cos \varphi_i + \sin \theta_s \cos \varphi_s \quad (31)$$

$$B = \sin \theta_i * \sin \varphi_i + \sin \theta_s \sin \varphi_s \quad (32)$$

$$D = \cos \theta_i + \cos \theta_s \quad (33)$$

Y,

L: longitud del cilindro [m]

a: radio del cilindro [m]

a_x, a_y, a_z : las componentes x, y, z de la polarización de la onda incidente

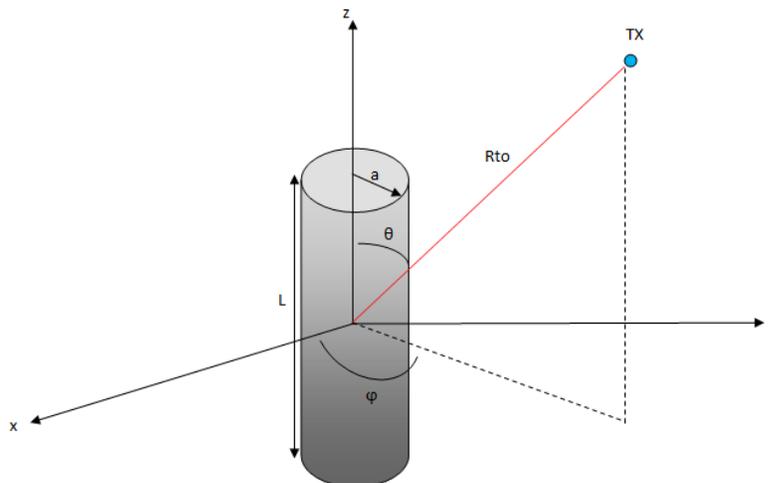
λ : longitud de onda

θ_i, φ_i : Dirección de propagación de la onda incidente

θ_s, φ_s : Dirección de propagación de la onda dispersada

k: número de onda

Figura 27. Ubicación del cilindro en el espacio en coordenadas esféricas



Mediante el siguiente procedimiento se modifica la ecuación (27) para tomar como entradas las ubicaciones del receptor y el transmisor en coordenadas cartesianas y no en coordenadas esféricas.

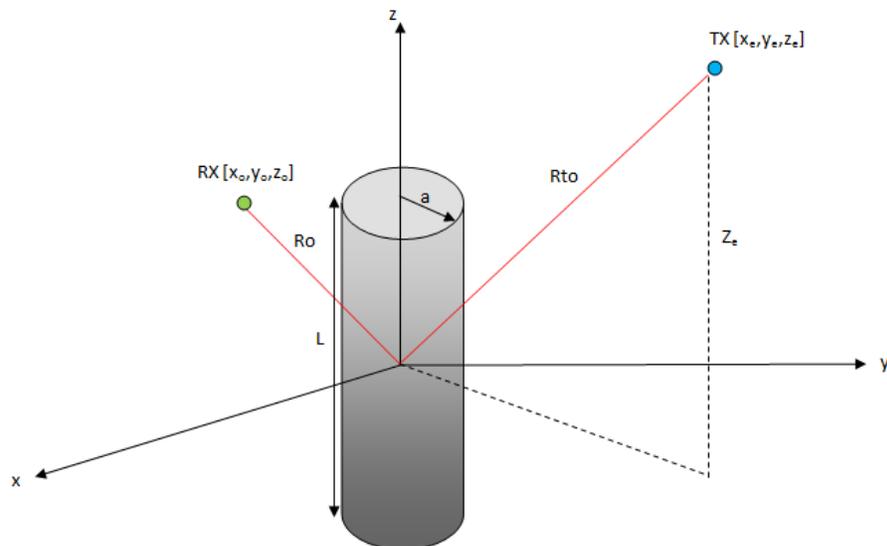
- Cambio de coordenadas esféricas a cartesianas

$$x = \cos \varphi * \sin \theta \tag{34}$$

$$y = \sin \varphi * \sin \theta \tag{35}$$

$$z = \cos \theta \tag{36}$$

Figura 28. Coordenadas cartesianas del transmisor y receptor respecto al origen



- Ecuaciones que caracterizan la onda recibida por el RX:

$$R_o = \sqrt{x_o^2 + y_o^2 + z_o^2} \tag{37}$$

$$\theta_s = \cos^{-1} \left(\frac{z_o}{R_o} \right) \tag{38}$$

$$\varphi_s = \tan^{-1} \left(\frac{y_o}{x_o} \right) \tag{39}$$

- Ecuaciones que caracterizan la onda emitida por el TX:

$$R_{to} = \sqrt{x_e^2 + y_e^2 + z_e^2} \tag{40}$$

$$\theta_i = \cos^{-1} \left(\frac{z_e}{R_{to}} \right) \tag{41}$$

$$\varphi_i = \tan^{-1} \left(\frac{y_e}{x_e} \right) \tag{42}$$

De esta manera los ángulos θ_s , φ_s , θ_i , φ_i podrán reemplazarse en las ecuaciones (28) a la (33) para cambiar a coordenadas cartesianas⁸.

5.2.2. Algoritmo en Matlab

Para determinar la RCS del cilindro en Matlab se realizaron m-files⁹ diferentes, de los cuales hay dos funciones llamadas en momentos determinados durante el proceso de programación. El desarrollo de los algoritmos se presenta a continuación:

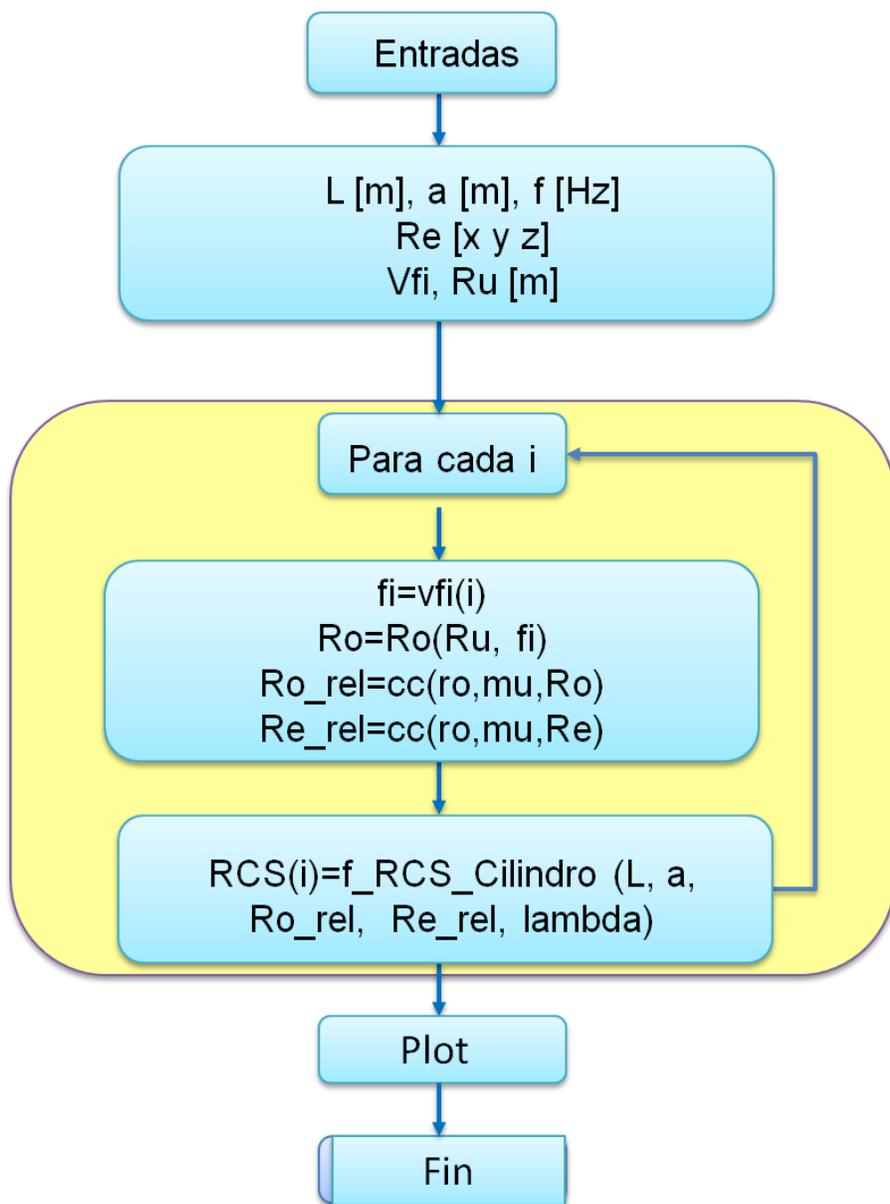
- **Algoritmo para determinar la RCS biestática del cilindro**

A continuación se presenta el mapa del proceso del algoritmo programación para calcular la RCS biestática para un cilindro de longitud L , radio a y frecuencia f determinada.

⁸ Este procedimiento no se muestra en el documento, ya que las ecuaciones quedan muy extensas, y Matlab las realiza sin ningún inconveniente dando como indicaciones iniciales las ecuaciones(37) a la (42).

⁹ Un archivo-m, o un archivo de secuencia de comandos, es un simple archivo de texto en el que puede colocar los comandos de MATLAB.

Figura 29. Mapa de flujo del algoritmo para la RCS del cilindro



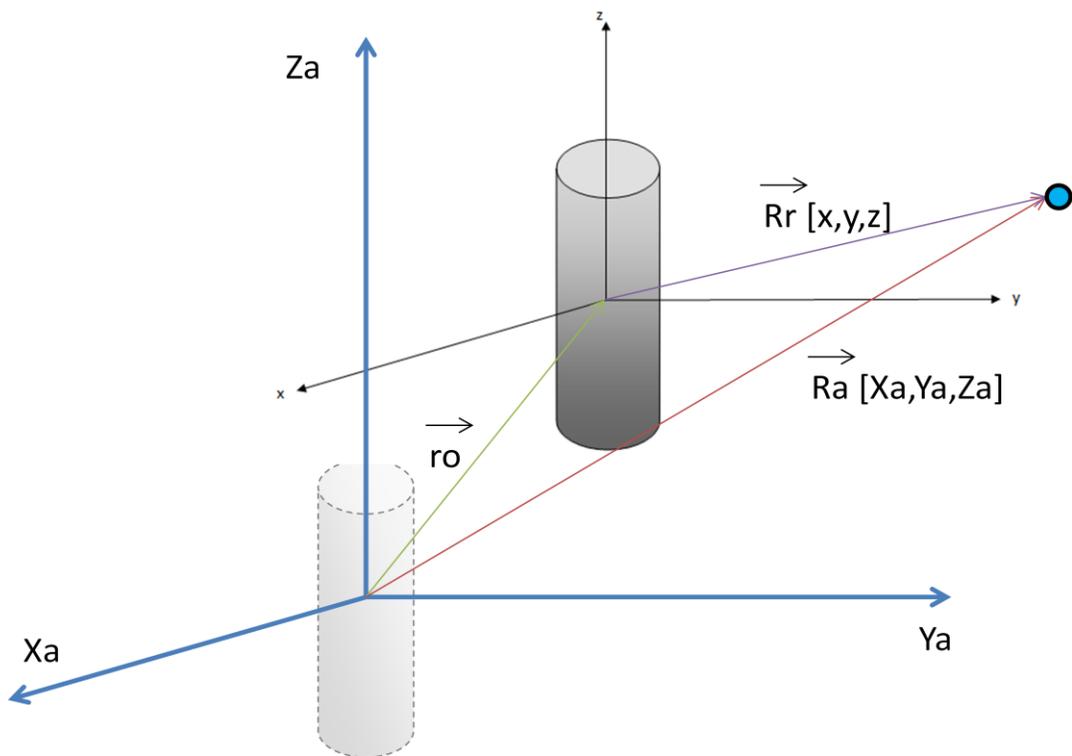
Donde además se desarrollan dos funciones adicionales, una para el cambio de coordenadas y otra para el cálculo de la RCS. Los mapas

del proceso del algoritmo de programación para cada una se presentan en los puntos posteriores.

- **Algoritmo para cambio de coordenadas (rotación y traslación de objetos en el espacio):**

De acuerdo a la siguiente gráfica se programa la función para el cambio de coordenadas, función que está desarrollada en el *anexo B*:

Figura 30. Traslación del cilindro en el espacio



Donde,

X_a , Y_a , Z_a son las coordenadas absolutas en la ubicación inicial del objeto (cilindro).

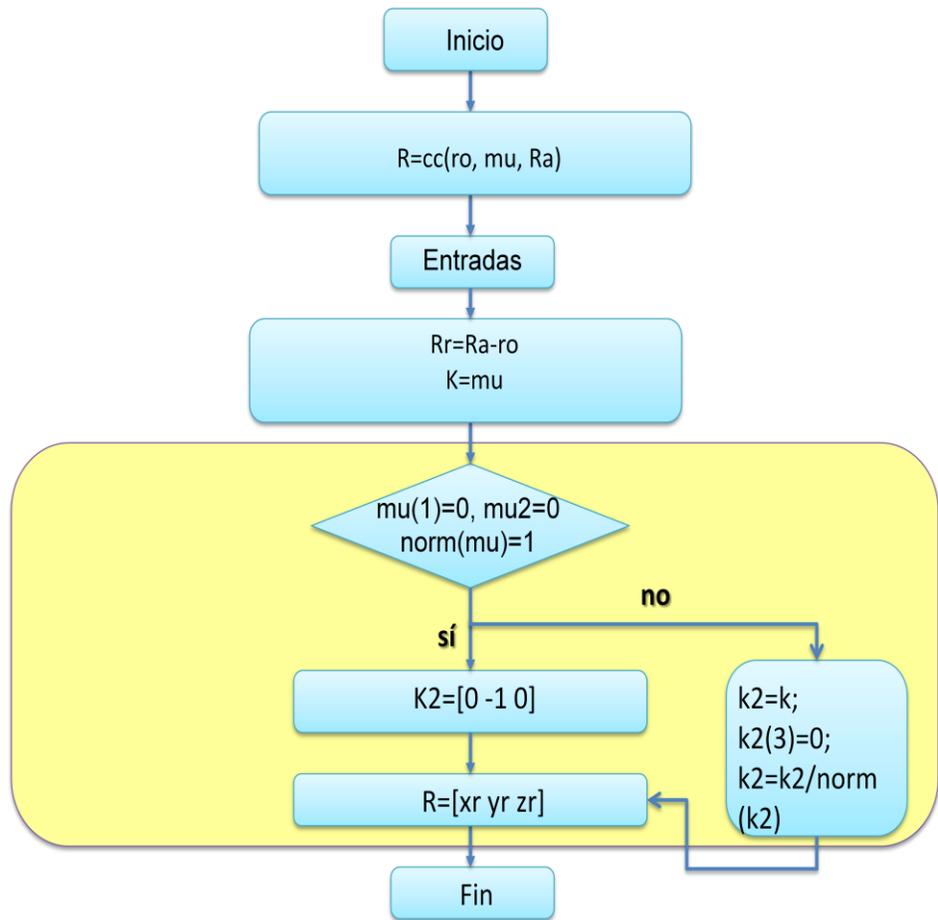
x, y, z son las coordenadas relativas en la ubicación final del objeto (cilindro).

r_o es el vector posición desde el origen de las coordenadas absolutas hasta el origen de las coordenadas relativas, punto que es a la vez el centro del cilindro en la ubicación final.

R_a es el vector posición que va desde el origen de las coordenadas absolutas hasta un punto fijo de observación en el espacio.

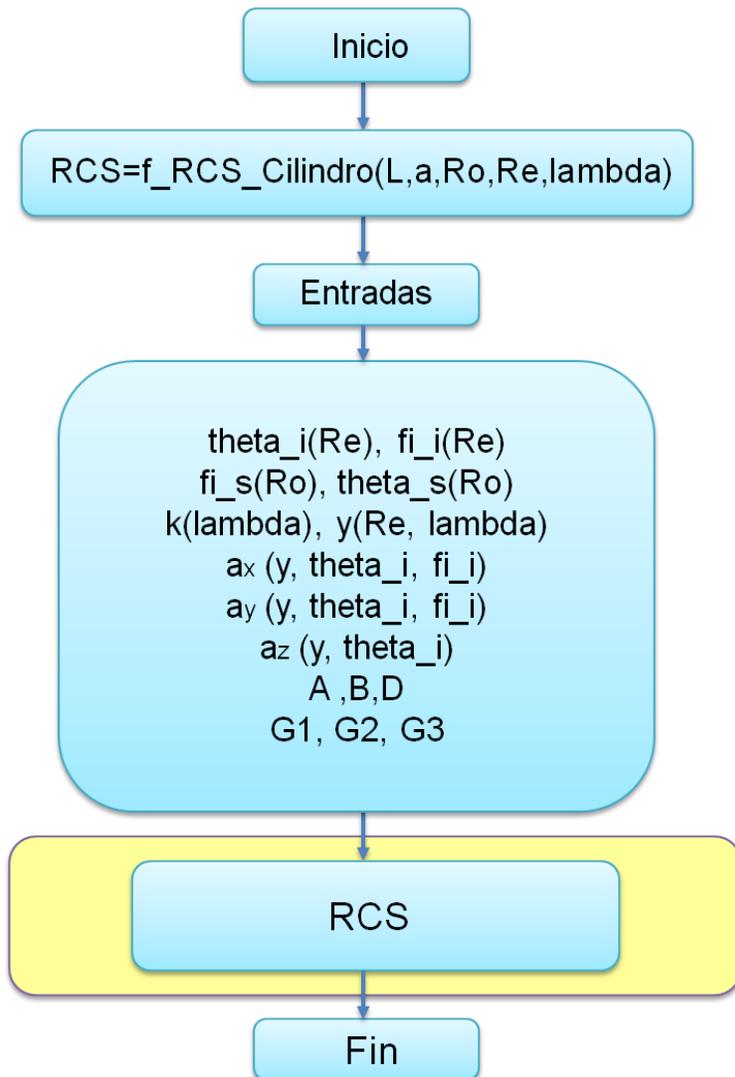
R_r es el vector posición que va desde el punto de ubicación final del cilindro hasta el punto de observación fijo.

Figura 31. Diagrama de flujo para la función de cambio de coordenadas



- **Función RCS_Cilindro:**

Figura 32. Diagrama de flujo para la función RCS_Cilindro



5.3. RCS DE LA FORMA COMPLEJA

Para determinar la RCS de cuerpos complejos pueden emplearse los diferentes métodos mencionados de forma general en el capítulo 4. Otro método empleado es descomponer dicho cuerpo en formas simples y determinar la RCS para cada forma simple. Según el libro *Radar System analysis and design using MATLAB*, en el capítulo referido a Radar Cross Section, la RCS de un blanco complejo es calculada por la combinación coherente de las secciones transversales de las formas simples que construyen el blanco complejo.

En general, un blanco complejo puede modelarse mediante un grupo de centros de dispersión individuales dispersos por el objeto (utilizando los métodos del capítulo 4 como elementos finitos o volúmenes finitos), estos centros de dispersión se modelan como puntos isotrópicos y según *Bassem R. Mahafza* este modelo es llamado *N-point model*. El otro modelo para determinar la RCS del blanco complejo se llamado *N-shape model* y es exactamente el utilizado en este trabajo de grado para determinar la RCS del modelo complejo aproximado a un aerogenerador. En este modelo se determinan igualmente los puntos de dispersión, los cuales están ubicados en puntos de referencia fijos en el espacio (Mahafza, 2013).

Además, se debe tener en cuenta y el libro lo resalta de manera importante, la separación relativa y los ángulos de aspecto entre los centros de dispersión y el objeto pues estos influyen en la RCS, tanto para objetos simples como complejos. Esto nos permite validar el desarrollo realizado en el trabajo de grado, ya que para determinar la RCS de todos los objetos se han tenido en cuenta las distancias relativas entre TX-objeto y RX-objeto.

El cálculo de la RCS para la aproximación al aerogenerador tiene las siguientes suposiciones:

- La torre del aerogenerador es un cilindro de radio constante en toda su longitud.
- Las palas se simulan como un disco.
- El aerogenerador tomado de referencia para establecer las dimensiones geométricas es el SWT-2.3-93 marca Siemens, ya que es el aerogenerador utilizado en un número significativo de parques eólicos españoles.

5.3.1. Cálculo teórico

Como se ha mencionado anteriormente, los cálculos correspondientes al aerogeneradores se desarrollan a partir de dos formas simples, el disco y el cilindro, cada uno asemejándose a una parte fundamental del aerogenerador. La siguientes figuras son una ilustración básica de cómo se representa la forma compleja en el espacio:

Figura 33. Aproximación de aerogenerador a formas simples

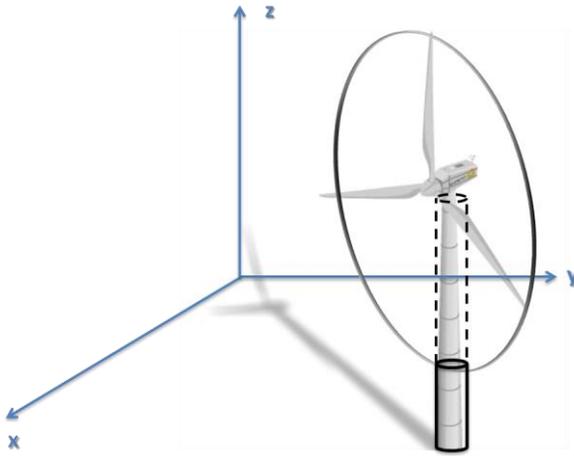
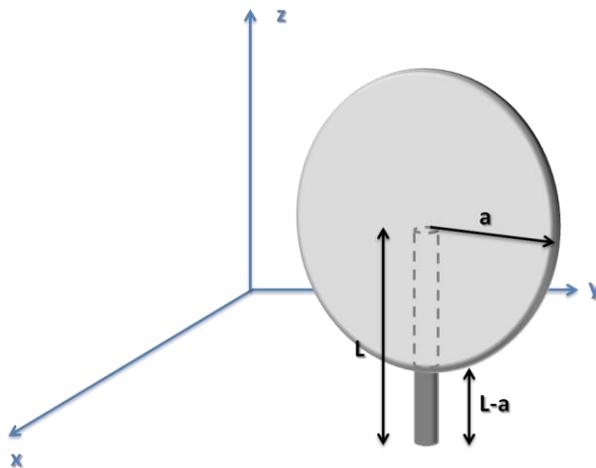


Figura 34. Dimensionamiento de formas simples



Donde,

a es el radio del disco (palas).

L es la longitud del cilindro (torre).

$L-a$ es la medida que se utilizará en el algoritmo de matlab para analizar el cilindro.

De esta manera, el aerogenerador puede ser analizado como el conjunto de dos formas simples, las cuales están ubicadas una sobre la otra en un plano imaginario del espacio, lo que permite que el disco no tape una parte del cilindro y puedan utilizarse las ecuaciones (9) y (27) respectivamente para el cálculo de la RCS.

5.3.2. Algoritmo en Matlab

Para del análisis del aerogenerador se crean dos algoritmos, el primero es utilizado para construir la estructura del aerogenerador, mediante el uso de un cilindro y un disco, ambos ubicados en el espacio en forma vertical. El segundo algoritmo es creado con el fin de analizar la RCS de un número específico de aerogeneradores ubicados en una matriz específica en el espacio. De tal forma que se puede hallar la RCS para un aerogenerador o para varios aerogeneradores.

Para el segundo algoritmo debe tenerse en cuenta que la ubicación del receptor no cambia en función de un ángulo θ , como en los algoritmos anteriores, sino en función de la altura de ubicación del receptor para tener la posibilidad de cambiarlo de ubicación respecto al origen del espacio y de altura en el eje z .

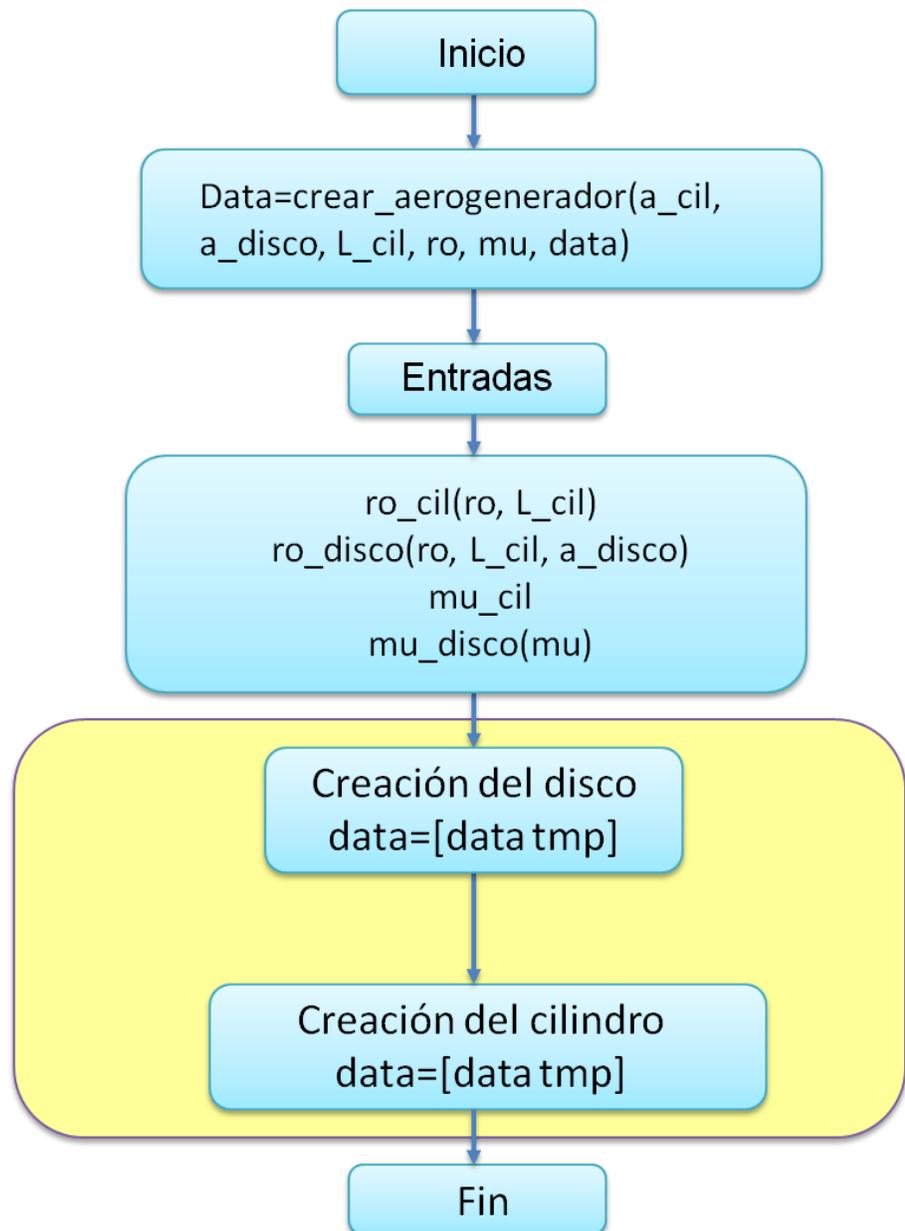
Los algoritmos se muestran a continuación:

- **Algoritmo para crear el aerogenerador:**

Este algoritmo se utiliza para construir un aerogenerador a partir de una placa plana y un cilindro como se muestra en las figuras anteriores. Es una aproximación básica donde la torre del aerogenerador tiene un radio constante y las palas del

aerogenerador se suponen como un disco de longitud cero y radio a. A continuación se presenta el diagrama de flujo para el algoritmo utilizado para crear la aproximación al aerogenerador:

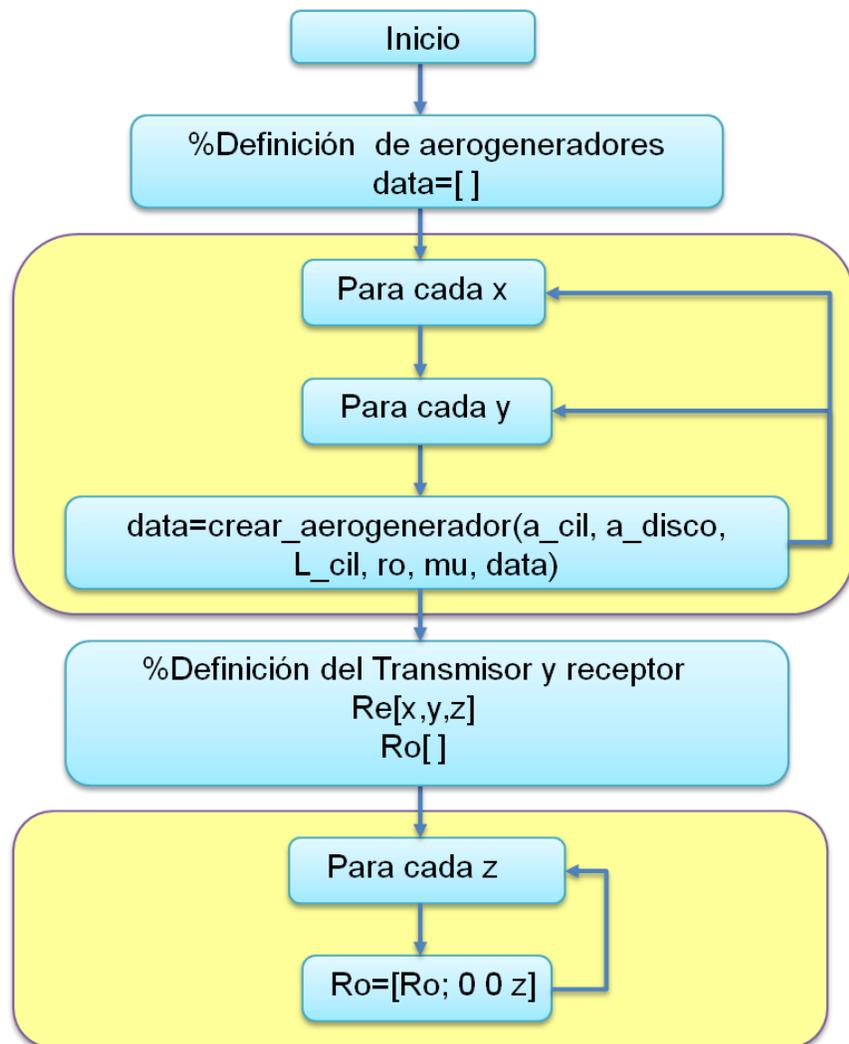
Figura 35. Diagrama de flujo para la creación del aerogenerador

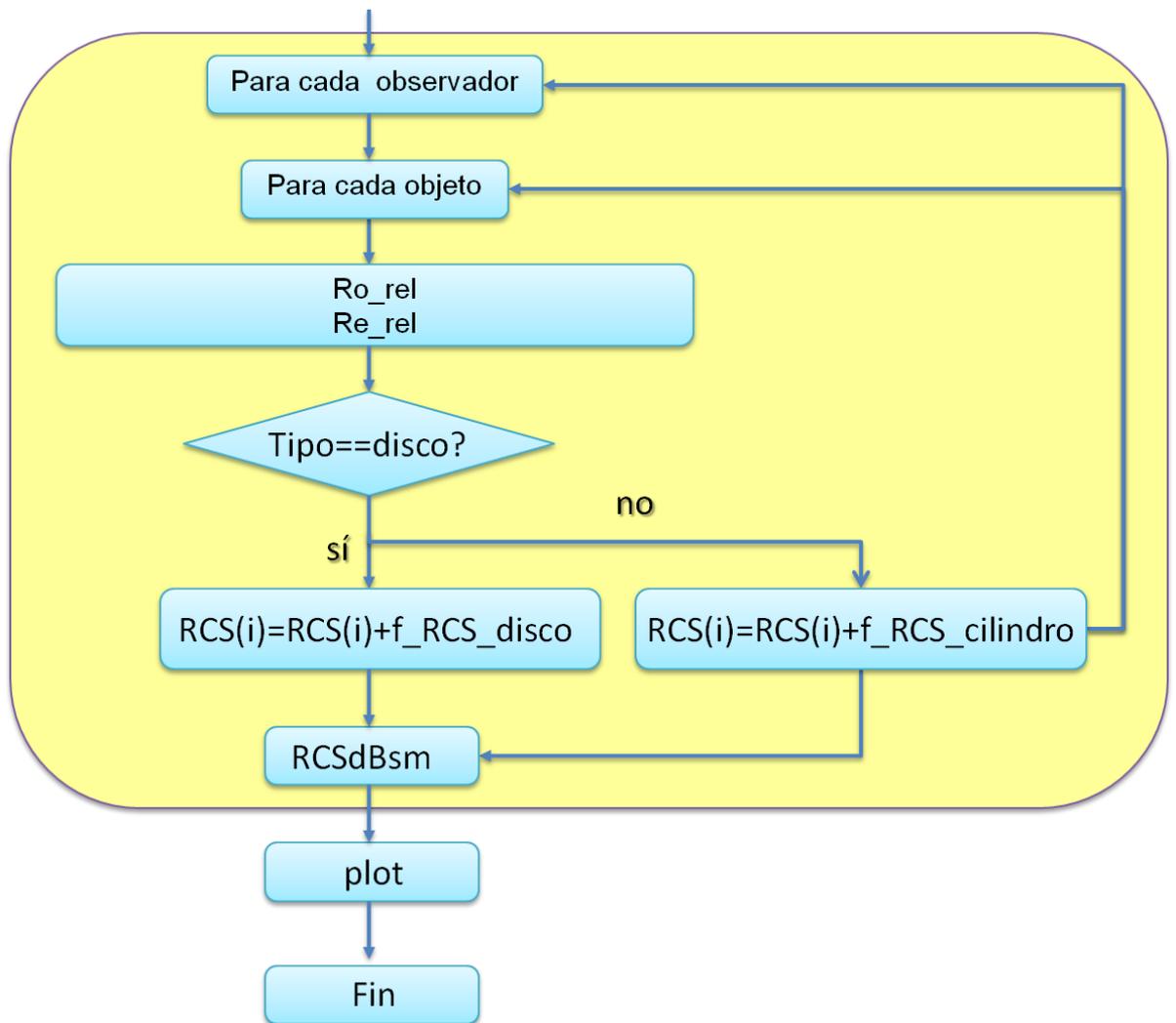


- **Algoritmo para la RCS del aerogenerador o grupo de aerogeneradores:**

Algoritmo que evaluará la RCS para uno o varios aerogeneradores ubicados en un punto determinado del espacio, teniendo en cuenta las distancias relativas del transmisor y receptor respecto a los ejes coordenados.

Figura 36. Diagrama de flujo para la evaluación de la RCS de los aerogeneradores





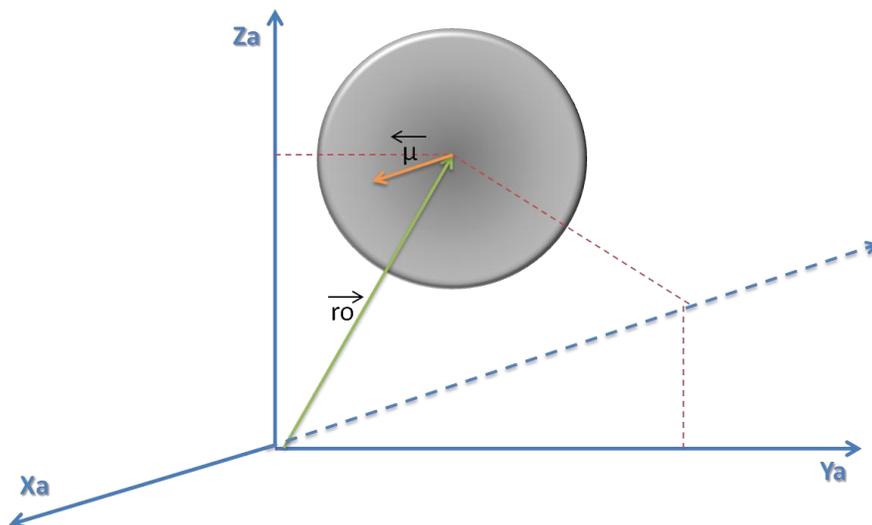
6. ANÁLISIS DE LA RCS

El valor de la RCS es en todos los casos un valor dependiente de las distancias relativas entre el emisor y el objeto y, el receptor y el objeto. Para este estudio en particular se han tomado como ejemplo distancias aproximadas de radar y aerogenerador ubicados en la Isla Gran Canaria en España. El desarrollo geométrico para encontrar la ubicación exacta del radar en el espacio se desarrolla en el *anexo A*.

6.1. PLACA PLANA (DISCO)

El análisis de la RCS del disco se realizará en todos los casos teniendo en cuenta 2 variables, una de estas siempre será el ángulo μ alrededor del cual cambiará la ubicación del receptor y la otra cambiará según el caso a estudiar. De igual forma, el radio del disco será en todo momento constante con el objetivo de garantizar el estudio para la misma aproximación geométrica de aerogenerador y así poder relacionar la RCS del disco y la RCS de la aproximación del aerogenerador. Además, la ubicación relativa del disco en el espacio se muestra en la siguiente figura:

Figura 37. Ubicación relativa del disco en el espacio



A continuación se desarrollan los análisis realizados para el disco:

- **RCS del disco con variación de la frecuencia**

El objetivo de variar la frecuencia es observar la variación de la RCS en las diferentes ubicaciones que puede adoptar el receptor dependiendo del rango de frecuencias en el cual trabajan este tipo de radares, es decir, analizar la RCS a través de la banda L, la cual tiene un intervalo de frecuencias entre 1 y 2 GHz.

Esto permitirá según la ubicación del transmisor y una posible para el receptor, saber a cuál frecuencia debe operarse el radar para tener una RCS mínima del disco y que éste genere la menor interferencia posible sobre el radar. El algoritmo en Matlab para este análisis se desarrolla en el *anexo C*.

Los datos y variables para este análisis son:

- ✓ **Datos:**

a= 46.5 m

Re= [3036.14 7571.73 74]

Ru=100

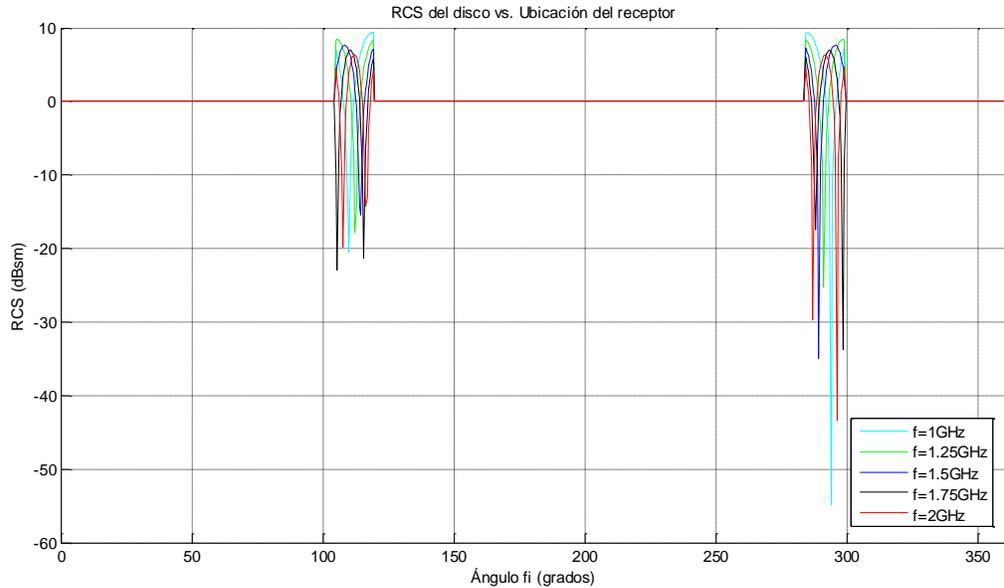
- ✓ **Variables:**

Ro= [Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50] con fi=0 : 2π

f= 1 a 2 GHz

Los resultados se evidencian en la siguiente figura:

Figura 38. RCS del disco vs. Posición del receptor, con variación en la frecuencia



La figura anterior muestra todas las gráficas de la RCS para diferentes frecuencias en la banda L. De allí se obtienen puntos específicos de ubicación del receptor donde la RCS es mínima. Estos puntos dependientes de la frecuencia se encuentran discriminados en la siguiente tabla:

Tabla 3. Valores mínimos de RCS en el rango de frecuencias establecido

Frecuencia [GHz]	Ángulo ϕ [grados]	RCS mínima [dBsm]
1	293,9	-58,87
1,25	291,1	-25,37
1,5	289,3	-34,98
1,75	298,5	-33,81
2	296,2	-43,39

Este análisis permite concluir que la frecuencia óptima a la que el transmisor debe enviar la onda para que la RCS del disco sea mínima es 1 GHz, es decir, el transmisor debe operar en la frecuencia más baja del rango de la banda L, así se presentará la RCS más baja, sin

embargo, debe tenerse en cuenta que estos resultados son para una ubicación específica del transmisor y el receptor.

- **RCS del disco con variación en el radio de ubicación del receptor (Ru)**

El objetivo de variar el radio Ru es poder analizar el receptor en una cantidad mayor de ubicaciones, de esta manera, al tener una sola frecuencia además de una geometría fija, se puede observar el impacto que tiene ubicar el receptor en un punto [x, y, z] cercano o lejano del disco y en general del aerogenerador.

Para este análisis se utilizará el resultado encontrado en el desarrollo anterior, es decir, que el presente algoritmo se solucionará con una frecuencia fija de 1 GHz, frecuencia que arrojó la RCS más baja en el anterior procedimiento. El algoritmo en Matlab es desarrollado en el *anexo C*.

Los datos y variables para el presente análisis se encuentran especificados a continuación:

- ✓ **Datos:**

a= 46.5 m

Re= [3036.14 7571.73 74]

f=1 GHz

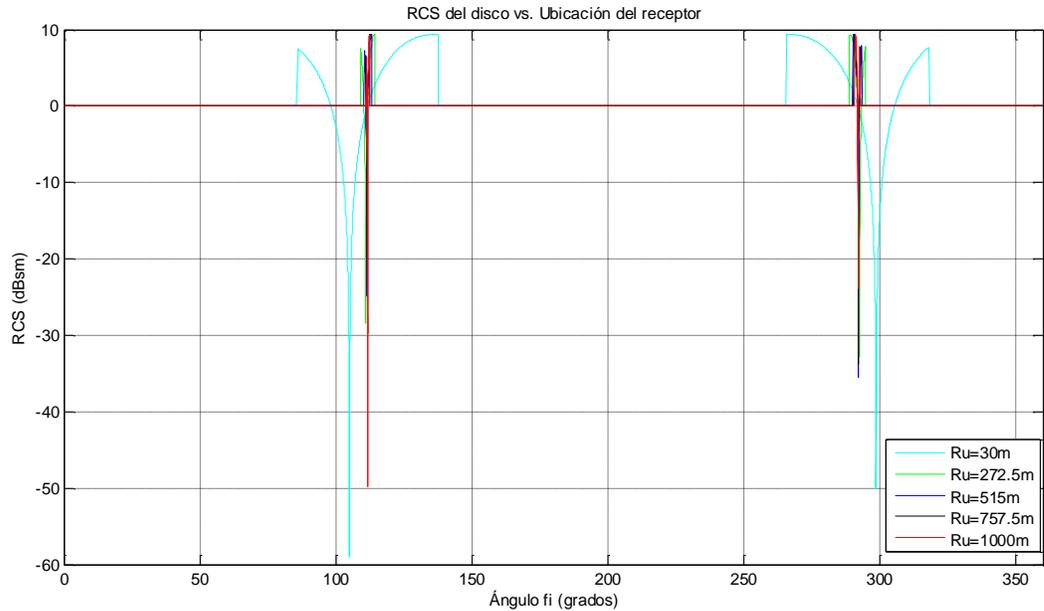
- ✓ **Variables:**

Ro= [Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50] con fi=0 : 2π

Ru= 30 a 1000 m

Los resultados se evidencian en la siguiente figura:

Figura 39. RCS del disco vs. Posición del receptor, con variación en Ru



La figura anterior muestra todas las gráficas de la RCS para diferentes radios de ubicación del receptor respecto a la posición del disco. De allí se obtienen puntos específicos de ubicación del receptor donde la RCS es mínima. Estos puntos dependientes del radio R_u se encuentran discriminados en la siguiente tabla:

Tabla 4. Valores mínimos de RCS en el rango de R_u establecido

R_u [m]	Ángulo ϕ_i [grados]	RCS mínima [dBsm]
30	105	-59,01
272,5	292,6	-32,8
515	292,3	-35,42
757,5	292,2	-33,7
1000	111,7	-49,8

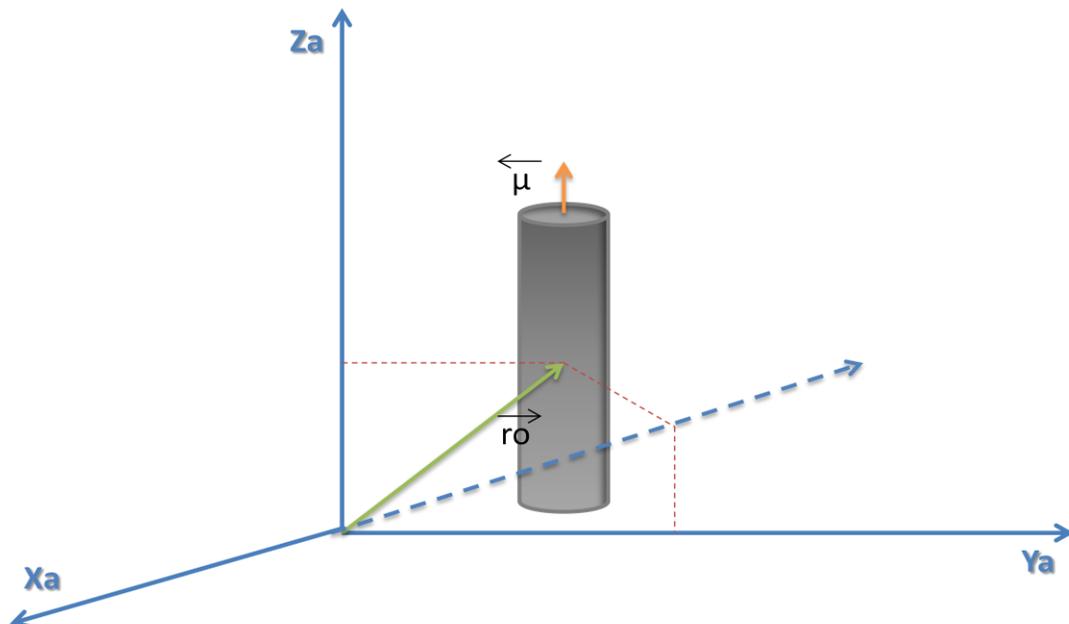
La distancia desde el punto de posición del disco hasta el receptor donde se presenta la menor RCS es 30m, es decir, la distancia más cercana entre el objeto y el receptor. Sin embargo, según la Figura 39,

en este valor de R_u existe un rango más amplio de ángulos ϕ donde la RCS es diferente de cero. Al analizar las gráficas teniendo en cuenta dicho rango y además el punto de mínimo valor de RCS, se puede concluir que la distancia R_u más adecuada para el receptor respecto al disco es de 111.7m.

6.2. CILINDRO

El análisis de la RCS del cilindro se realiza en todos los casos teniendo en cuenta 2 variables, una de estas siempre es el ángulo ϕ alrededor del cual cambia la ubicación del receptor y la otra varía según el caso a estudiar. El radio del cilindro y su longitud son en todo momento constantes con el objetivo de garantizar el estudio para la misma aproximación geométrica de aerogenerador y así poder relacionar la RCS del cilindro con la RCS del aerogenerador. La ubicación relativa del cilindro en el espacio se muestra en la siguiente figura:

Figura 40. Ubicación relativa del cilindro en el espacio



A continuación se desarrollan los análisis realizados para el cilindro:

- **RCS del cilindro con variación de la frecuencia**

Este análisis se realiza para el mismo objetivo planteado en el análisis de la RCS del disco con variación de la frecuencia. Así, mediante la variación de la frecuencia en el algoritmo del cilindro se puede obtener una ubicación tentativa para el receptor afectando mínimamente o en ningún porcentaje al radar. El algoritmo en Matlab para este análisis se desarrolla en el *anexo D*.

Los datos y variables para el presente análisis se encuentran especificados a continuación:

- ✓ **Datos:**

a= 4.5m

L=80m

Re= [3036.14 7571.73 74]

Ru=50m

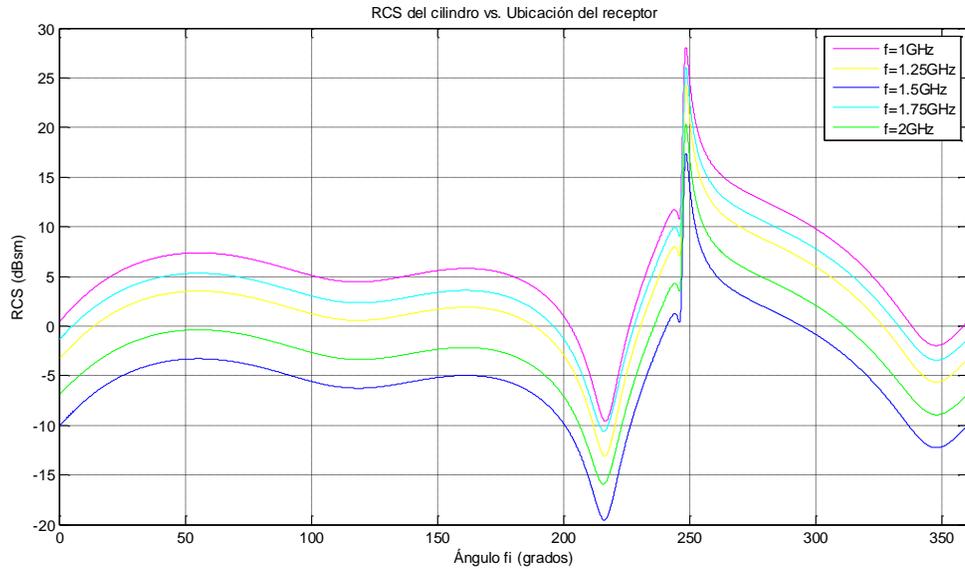
- ✓ **Variables:**

Ro= [Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50] con $fi=0 : 2\pi$

f= 1 a 2 GHz

Los resultados se evidencian en la siguiente figura:

Figura 41. RCS del cilindro vs. Ubicación del receptor, con variación en la frecuencia



La figura anterior muestra todas las gráficas de la RCS para diferentes frecuencias en la banda L. De allí se obtienen puntos específicos de ubicación del receptor donde la RCS es mínima. Sin embargo, es difícil llegar a una conclusión tomando sólo estas cinco frecuencias, ya que el comportamiento de las gráficas no tiene una segmentación específica.

Los puntos donde la RCS es mínima para estas cinco frecuencias se observan en la siguiente tabla:

Tabla 5. RCS del cilindro en la banda de frecuencia L

Frecuencia [GHz]	Ángulo ϕ [grados]	RCS mínima [dBsm]
1	216,6	-9,589
1,25	216,5	-13,09
1,5	216,4	-19,55
1,75	216,2	-10,58
2	215,9	-15,93

El comportamiento de las gráficas en esta evaluación es oscilatorio, la RCS ha sido evaluada para el mismo rango de frecuencia en distintos intervalos, sin embargo, el ángulo ϕ donde la RCS es mínima es donde

la frecuencia es 1,5 GHz. Dependiendo del número de intervalos de evaluación de la RCS según la frecuencia, la variación del orden de las gráficas está determinado. Para este caso específico la RCS disminuye al aumentar la frecuencia en 0,75GHz, pero sólo en valores específicos de la frecuencia.

El valor mínimo de RCS no pudo ser determinado por medio de un factor concluyente que se obtuviese del orden de las gráficas, este valor sólo pudo encontrarse por medio de la experimentación y desarrollo del algoritmo en diferentes intervalos.

- **RCS del cilindro con variación en el radio de ubicación del receptor (Ru)**

Cumpliendo con el mismo objetivo del análisis de la RCS del disco con variación en el radio de ubicación del receptor (Ru) se realiza un desarrollo algorítmico para el cilindro.

El objetivo de variar el radio Ru es poder analizar el receptor en una cantidad mayor de ubicaciones, de esta manera, al tener una sola frecuencia además de una geometría fija, se puede observar el impacto que tiene ubicar el receptor en un punto [x, y, z] cercano o lejano de la ubicación del disco y en general del aerogenerador.

Para este análisis se utilizará la frecuencia de 1GHz, que aunque no fue el resultado del anterior procedimiento, permitirá comparar con los resultados del disco. El algoritmo en Matlab es desarrollado en el *anexo D*.

Los datos y variables para el presente análisis se encuentran especificados a continuación:

- ✓ **Datos:**
 - a= 4.5m
 - L=80m
 - Re= [3036.14 7571.73 74]
 - f=1 GHz

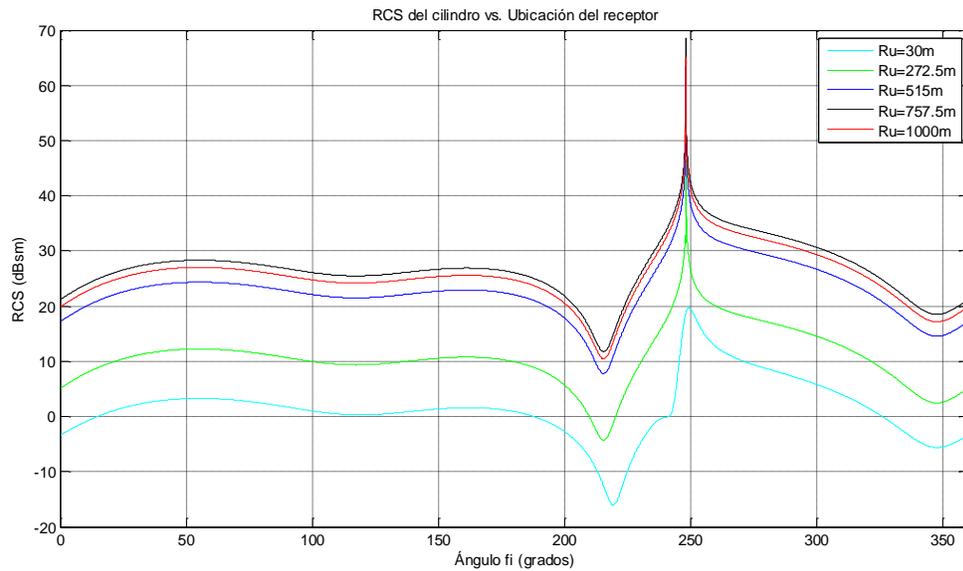
✓ **Variables:**

$$R_o = [R_u \cdot \cos(\phi_i) \quad R_u \cdot \sin(\phi_i) \quad 50] \quad \text{con } \phi_i = 0 : 2\pi$$

$$R_u = 30 \text{ a } 1000 \text{ m}$$

Los resultados se evidencian en la siguiente figura:

Figura 42. RCS del cilindro vs. Ubicación del receptor, variando R_u



Mediante el análisis gráfico se puede obtener como conclusión que la RCS mínima se da cuando el receptor está ubicado a 30 m del origen relativo, es decir, del punto de posición del cilindro. Para saber cuál es este punto se realiza la siguiente tabla:

Tabla 6. Valores de RCS mínimos para el cilindro para las distancias R_u específicas

R_u [m]	Ángulo ϕ_i [grados]	RCS mínima [dBsm]
30	219,4	-16,09
272,5	215,6	-4,288
515	215,6	7,796
757,5	215,6	11,76
1000	215,6	10,44

Al hacer una comparación entre la tabla anterior y la gráfica correspondiente, se observa que el punto donde la RCS es mínima coincide con el punto del análisis del disco, sin embargo, cuando la distancia va en aumento puede observarse que la diferencia entre los puntos de mínima RCS es relativamente pequeña, incluso para la distancia de 1000m la RCS mínima es menor que para la distancia de 757,5m. Este fenómeno es lógico, ya que a una distancia mayor cuando el receptor está muy alejado del objeto, la RCS irá disminuyendo.

La conclusión anterior puede verse contradictoria con los resultados, sin embargo, cuando la distancia de separación entre receptor y objeto es relativamente pequeña, es lógico ver que la RCS es menor cuando dicha distancia es menor, ya que el receptor recibirá menos ondas emitidas por el objeto. Éste recibirá sólo las más directas.

6.3. APROXIMACIÓN AL AEROGENERADOR

Para el análisis de la aproximación al aerogenerador la variable ángulo ϕ sobre la cual cambia la posición del receptor es reemplazada por la variable z , de esta manera, el receptor ya no cambia en una circunferencia sobre un plano específico en el espacio sino sobre el eje z . Esto se hace para analizar otra variación que puede afectar la RCS, ya sea del objeto simple o de la aproximación. La otra variable que varía es la frecuencia.

En este desarrollo, se une el disco con el cilindro para crear una aproximación de un aerogenerador. Es una forma básica que puede llevar a resultados veraces, los cuales pueden ser utilizados para estudios previos de ubicación, ya sea del aerogenerador o del receptor, suponiendo que el transmisor deba estar situado en una posición fija en el espacio. El algoritmo completo para analizar la RCS de la forma compleja se encuentra desarrollado en el *anexo D*. Los análisis para el conjunto de aerogeneradores se desarrollan así:

- **RCS de aerogenerador variando la frecuencia**

Es importante al momento de analizar el conjunto de formas simples, evaluar la RCS para uno o varios aerogeneradores, ya que para obtener resultados correctos la RCS mínima para un aerogenerador debe ser menor que la RCS mínima para varios aerogeneradores.

Este análisis evalúa la RCS de un sólo aerogenerador en varias frecuencias, de esta manera es posible comparar de forma sencilla con los demás análisis para la forma compleja. El algoritmo en Matlab de este punto se encuentra especificado en el *anexo E*. Los datos y variables para el presente desarrollo son:

- ✓ **Datos:**

a_cilindro= 4.5m

L_cilindro= 80m

a_disco= 46.5m

x=0 [m] (ubicación aerogenerador)

y=0 [m] (ubicación aerogenerador)

Re= [3036.14 7571.73 74]

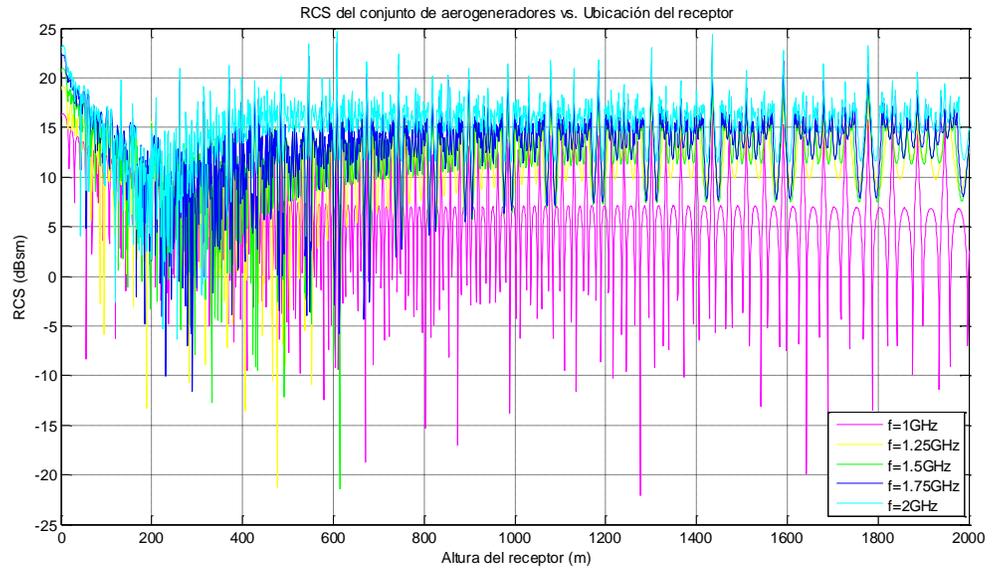
- ✓ **Variables:**

Ro= [Ro; 0 0 z] con z=0 :1: 2000 [m]

f=1 a 2 GHz

La gráfica obtenida para estos datos y variables es:

Figura 43. RCS de un aerogenerador vs. Altura del receptor, variando la frecuencia



De esta manera puede observarse que todas las gráficas tienen valores que no distan mucho unos de otros, sin embargo, los puntos de mínima RCS sólo son similares en las gráficas para 1, 1.25 y 1.5 GHz, pudiendo discriminarse exactamente mediante la siguiente tabla:

Tabla 7. Valores de RCS mínimos para un aerogenerador en función del cambio en la frecuencia

Frecuencia [GHz]	Altura Receptor [m]	RCS mínima [dBsm]
1	1276	-22,09
1,25	476	-21,35
1,5	614	-21,43
1,75	290	-11,6
2	256	-6,38

Comparativamente los tres primeros valores de RCS mínima son similares, por lo cual es posible que un radar opere en cualquiera de las tres frecuencias respetando la posición R_0 del receptor.

- **RCS de un aerogenerador vs. Altura del receptor, con el aerogenerador a una distancia simétrica entre TX-objeto y, RX-objeto**

Los datos para el presenta análisis son:

✓ **Datos:**

a_cilindro= 4.5m

L_cilindro= 80m

a_disco= 46.5m

x=3036.14 [m] (ubicación aerogenerador)

y=3785.865 [m] (ubicación aerogenerador)

Re= [3036.14 7571.73 74]

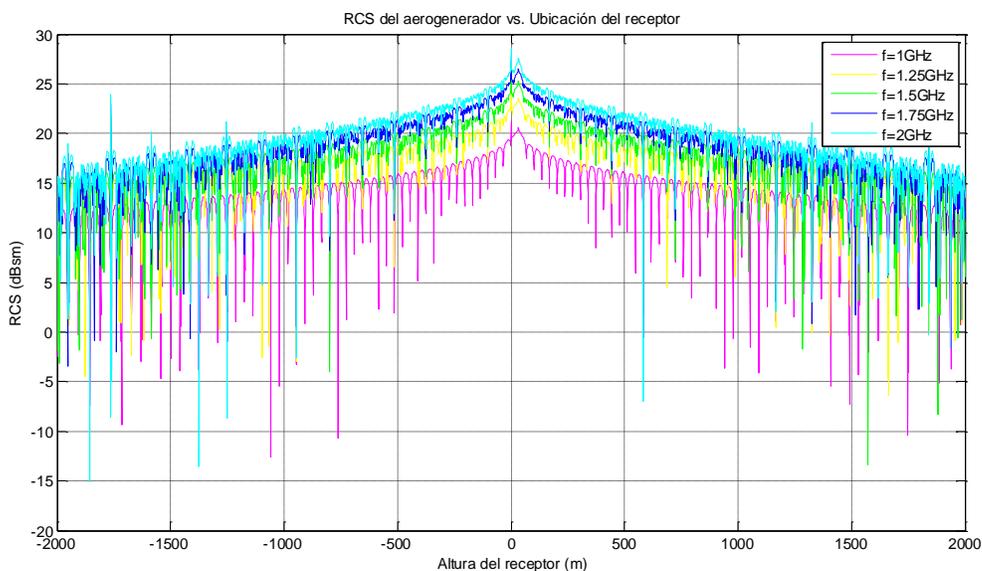
✓ **Variables:**

Ro= [Ro; 3036.14 0 z] con z=-2000 :1: 2000 [m]

f=1 a 2 GHz

El objetivo principal de este análisis es verificar el algoritmo para el aerogenerador y validar todos los procesos que se han realizado hasta el momento, esto debido a que la gráfica de la RCS debe tener un punto máximo cuando el receptor se encuentra cercano a la altura 0 y ser relativamente simétrica hacia el eje y positivo y hacia el eje y negativo, ya que el receptor se moverá en el mismo rango hacia ambos extremos del eje z. Además, la gráfica muestra claramente la oscilación de las ondas electromagnéticas al ser reflejadas por el objeto (aerogenerador). A continuación se muestra la gráfica resultante:

Figura 44. RCS del aerogenerador vs. Altura del receptor, con distancia simétrica



La tabla con los valores mínimos se muestra a continuación:

Tabla 8. Valores de RCS mínima para una aerogenerador ubicado simétricamente

Frecuencia [GHz]	Altura Receptor [m]	RCS mínima [dBsm]
1	-1059	-12,63
1,25	1663	-6,38
1,5	1574	-13,36
1,75	-1761	-3,85
2	-1855	-15,08

- **RCS de conjunto de aerogeneradores variando la frecuencia (27 aerogeneradores)**

Este análisis se realiza con el fin de comparar la RCS entre un aerogenerador y un grupo de los mismos, teniendo en cuenta el cambio en la frecuencia. El algoritmo en Matlab para este punto se encuentra

especificado en el *anexo E*. Los datos y variables para este análisis son:

✓ **Datos:**

$a_{\text{cilindro}} = 4.5\text{m}$

$L_{\text{cilindro}} = 80\text{m}$

$a_{\text{disco}} = 46.5\text{m}$

$x = 5000:250:5500$ [m] (ubicación aerogeneradores)

$y = 0:250:2000$ [m] (ubicación aerogeneradores)

$Re = [3036.14 \ 7571.73 \ 74]$

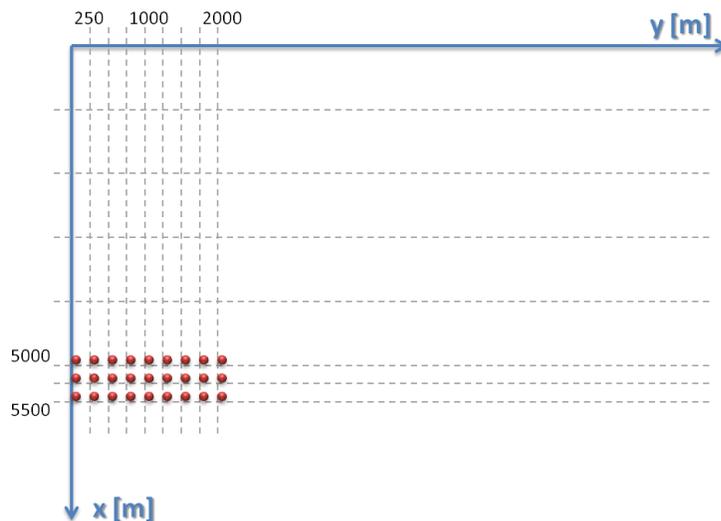
✓ **Variables:**

$Ro = [Ro; 0 \ 0 \ z]$ con $z = 0 : 1 : 2000$ [m]

$f = 1$ a 2 GHz

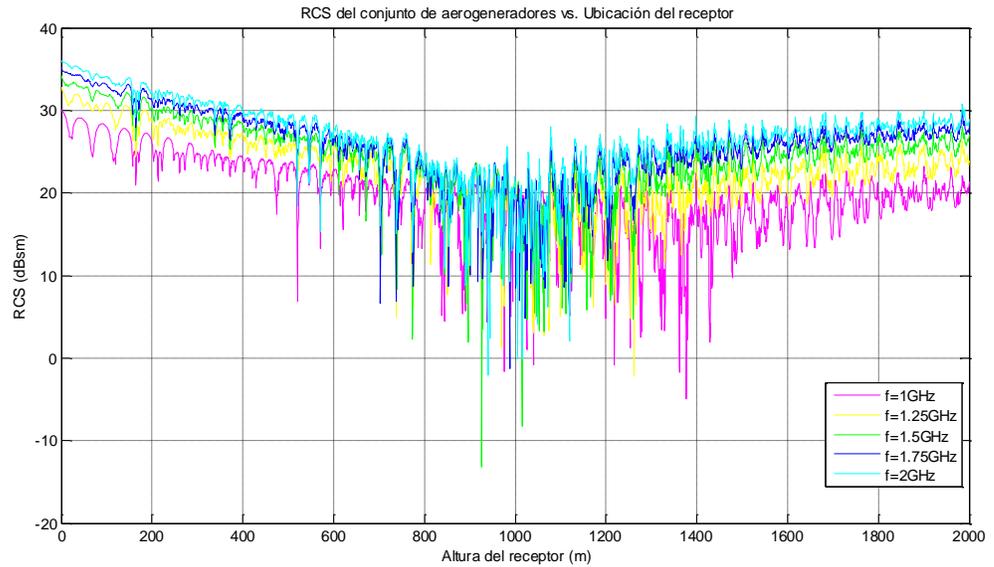
Para este análisis se construye una matriz de aerogeneradores ubicados en el plano xy con $z=0$. Esto permite ubicar más de un aerogenerador en el espacio y así simular un parque eólico. Este desarrollo se hace con 27 aerogeneradores los cuales están ubicados como se muestra en la siguiente gráfica (esta figura no se encuentra a escala, es sólo una imagen demostrativa de la ubicación aproximada de los aerogeneradores):

Figura 45. Ubicación de los aerogeneradores en el plano xy



Los resultados se evidencian en la siguiente figura:

Figura 46. RCS de los 27 aerogeneradores vs. Ubicación del receptor



Esta gráfica deja ver exactamente cuál es el punto donde la RCS es mínima y cómo en los intervalos $[0, 600]$ y $[1400, 2000]$ en x , la gráfica de la RCS a una frecuencia de 1.5 GHz se ubica en el medio de las demás gráficas, es decir que posiblemente sea la frecuencia adecuada para la operación del radar, pues aunque todos los puntos de esta gráfica no son mínimos, es la que presenta valores promedio de RCS y una oscilación menor en comparación con las demás gráficas.

La presentación clara de estos resultados se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 9. Altura del receptor donde la RCS es mínima variando la frecuencia

Frecuencia [GHz]	Altura Receptor [m]	RCS mínima [dBsm]
1	1377	-4,956
1,25	1262	-2,087
1,5	926	-13,23
1,75	988	-1,277
2	940	-2,024

Resultados que permiten obtener variar conclusiones dependiendo de la conveniencia y ubicación del sistema como un sólo conjunto, pues estos datos permiten cambiar de ubicación el receptor u operar a una frecuencia determinada el radar.

- **RCS para un conjunto de 51 aerogeneradores vs. Altura de receptor**

Finalmente se evalúa el algoritmo para un número mayor de aerogeneradores, similar al de algunos parques eólicos como el del parque eólico Finca de Mogán ubicado en Tenerife, España. De esta manera se observa el incremento en el valor de la RCS mínima para un número elevado de aerogeneradores y posteriormente en las conclusiones podrá compararse esta RCS con valores típicos de objetos comunes. El algoritmo en Matlab para la evaluación de los 51 aerogeneradores se desarrolla en el *anexo E*. Los datos y variables para este análisis son:

- ✓ **Datos:**
 - a_cilindro= 4.5m
 - L_cilindro= 80m
 - a_disco= 46.5m
 - x=5000:250:5500 [m] (ubicación aerogeneradores)
 - y=-2000:250:2000 [m] (ubicación aerogeneradores)
 - Re= [3036.14 7571.73 74]

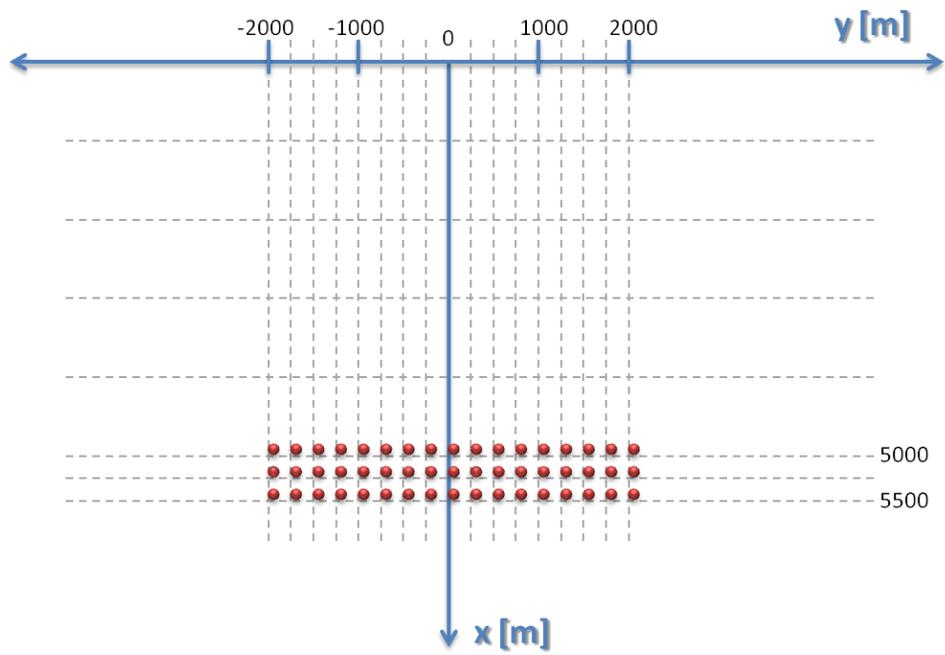
✓ **Variables:**

$R_0 = [R_0; 0 \ 0 \ z]$ con $z=0 : 1: 2000$ [m]

$f=1$ a 2 GHz

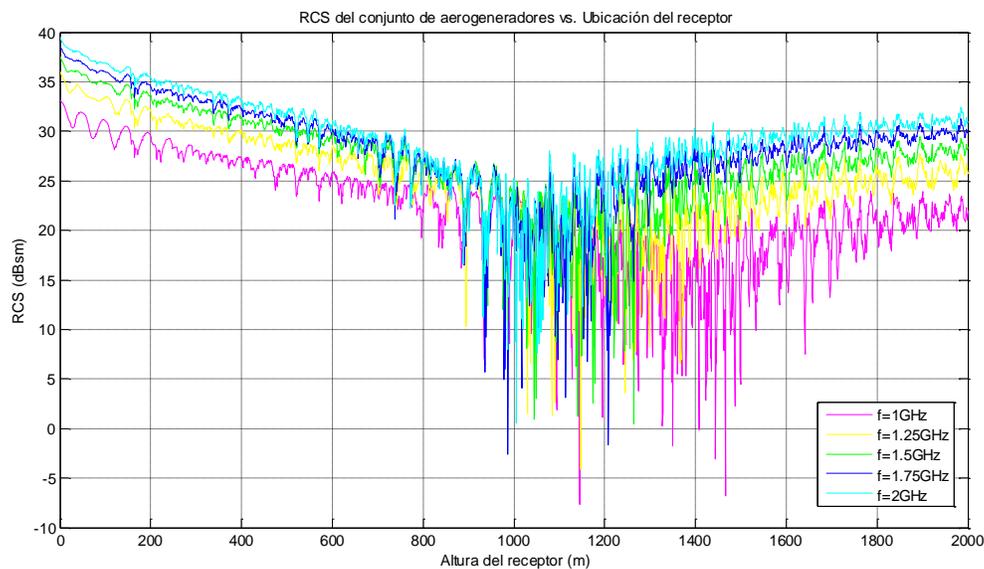
Además, un acercamiento de la posición de los aerogeneradores sobre el plano xy se observa en la siguiente figura:

Figura 47. Ubicación aproximada de 51 aerogeneradores en el plano xy



Los resultados para esta ubicación y número de aerogeneradores se evidencian en la siguiente gráfica:

Figura 48. RCS del conjunto de 51 aerogeneradores vs. Ubicación del receptor



Los valores exactos de mínima RCS se presentan en la tabla a continuación:

Tabla 10. Valores de mínima RCS para las diferentes frecuencia, en el caso de 51 aerogeneradores

Frecuencia [GHz]	Altura Receptor [m]	RCS mínima [dBsm]
1	1145	-7,657
1,25	1147	-4,11
1,5	1265	0,436
1,75	987	-2,599
2	1006	0,5709

Resultados que al analizar conjuntamente con los demás análisis realizados en esta parte, muestran un aumento significativo en la RCS al aumentar el número de aerogeneradores.

7. CONCLUSIONES

El algoritmo desarrollado tiene como alcance realizar evaluaciones de la sección transversal de radar biestática (RCS biestática) para una placa plana circular y un cilindro, ambos de cualquier dimensión y ubicación fija en el espacio. Además evalúa el impacto en la medición de la RCS biestática de uno o varios aerogeneradores por medio de la unión básica de objetos (cilindro y placa circular), los cuales pueden ser ubicados con relación a un punto de referencia para simular un parque eólico y determinar el impacto de dicha RCS sobre la señal receptora en función de la posición de estos y la ubicación de un receptor de la señal radar.

Teniendo en cuenta que obtener una menor RCS significa tener menos señales de radar no deseadas, se evaluaron dos variables durante el desarrollo del trabajo de grado, frecuencia teniendo en cuenta la operación de banda de las radioayudas aeroportuarias y posición de recepción de la señal.

Al variar la frecuencia pudo determinarse que la menor RCS de una placa plana circular se obtiene para 1 GHz donde la RCS mínima es de -58,87 dBsm, es decir, $1,3e-6 \text{ m}^2$ y para un cilindro sucede cuando la frecuencia es de 1,5GHz donde la RCS mínima es de -19,55 dBsm, es decir, $1,1e-2 \text{ m}^2$. Ambos resultados resultan ser valores pequeños comparados con la RCS típica de una aeronave comercial, la cual se encuentra alrededor de 1 m^2 , por lo tanto, ninguno de los dos objetos se verá reflejado como un objeto no deseado en el radar.

Específicamente para el caso del disco, el receptor debe estar idealmente ubicado en el punto $R_0=[20,3 \ -45,7 \ 50]$, sin embargo, este puede estar ubicado en los dos intervalos donde hay valores mínimos de RCS, es decir, en una ubicación donde las ondas emitidas por las caras del disco no incidan sobre el receptor o donde el objeto no recibe las ondas transmitidas. Para el caso del cilindro, el receptor debe ubicarse en la posición $R_0=[-40,2 \ -29,7 \ 50]$ para obtener el valor mínimo de RCS teniendo en cuenta la posición del transmisor establecida en el análisis.

La segunda variable, posición del receptor, permitió determinar que la RCS mínima de una placa plana circular es -59,01 dBsm a una distancia de 30 m, sin embargo, como esta distancia es representada por la gráfica con mayor rango de variación en la distancia, la RCS concluyente para este análisis fue -49,8 dBsm ($1,05e-5 \text{ m}^2$) la cual no dista mucho de la anterior; ésta para una distancia R_u de 1000 m. Para el caso del cilindro, la RCS mínima es -16,09 dBsm, la cual equivale a $2,46 \text{ m}^2$ para una distancia R_u de 30 m. Cuando se mira la RCS para cada objeto desde un punto analítico se concluye que la RCS mínima del cilindro debe ser más alta que la del disco, esto debido a que el área que refleja las ondas sobre el receptor en el cilindro es mayor que en el receptor; al analizar cuantitativamente esta suposición se determina la veracidad de lo anteriormente mencionado. Esta conclusión teniendo en cuenta que la frecuencia de evaluación de ambos análisis fue 1GHz.

En el caso del disco para la anterior evaluación la posición del receptor debe estar en el punto $R_o = [-369,8 \quad 929,13 \quad 50]$, teniendo en cuenta que no es el punto donde la RCS es mínima en comparación a las demás gráficas, sino el punto donde el valor de RCS es mínimo para la distancia R_u más adecuada, ya que la distancia $R_u = 30\text{m}$ es donde está el valor mínimo pero también es donde hay un rango mayor donde la RCS es mayor a 0 dBsm (1 m^2). Para el cilindro, la posición del receptor donde el valor de RCS es mínimo está en el punto $R_o = [-23,2 \quad -19 \quad 50]$ ¹⁰.

Se desarrolló un algoritmo que permite calcular la RCS para un grupo de aerogeneradores, estos conformados a partir de una placa plana circular y un cilindro, algoritmos desarrollados en función de variables significativas como la distancia TX-objeto y la distancia RX-objeto. Estos aerogeneradores se pueden evaluar en sin número de disposiciones para determinar la mejor ubicación de la antena receptora en pro de obtener la menor cantidad de señales no deseadas. Las disposiciones y condiciones evaluadas, obtienen los resultados óptimos de menor RCS cuando al evaluar un sólo aerogenerador, el receptor está ubicado en el punto $R_o = [0 \quad 0 \quad 1276]$ donde el origen del vector posición está en el origen de las coordenadas absolutas. Allí, la RCS mínima es -22,09 dBsm, es decir, $6,2e-3 \text{ m}^2$ a una frecuencia de 1GHz.

¹⁰ Las ubicaciones mencionadas tienen unidades en metros, tanto para las evaluaciones donde la frecuencia es la variable como para las demás donde la distancia R_u es la que varía.

Al evaluar un grupo de aerogeneradores y aumentar el número de estos cuando se realizaba un nuevo análisis permitió determinar que cuando el número de aerogeneradores aumenta también aumenta el valor de RCS mínima, es decir, pasa de -22,09 dBsm cuando se evalúa un aerogenerador a -13,23 dBsm para 27 aerogeneradores y finalmente, a -7,657 dBsm para 51 aerogeneradores. Sin embargo, el valor más alto de los tres anteriormente mencionados es un valor bajo de RCS, -7,657 dBsm equivale a 0,17 m² en comparación a la RCS aproximada de una aeronave comercial (RCS=1 m²).

Finalmente puede decirse que es posible discriminar entre un objeto, ya sea una placa plana circular, un cilindro, un aerogenerador o un grupo determinado de estos y, una aeronave en la imagen de un radar, ya que la RCS para estos objetos es significativamente diferente de la RCS de una aeronave comercial, sin embargo, esto sólo es posible para las ubicaciones específicas determinadas en el desarrollo del trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

AENA. (2012). *AIP ESPAÑA AD2 - GCLP1*. Datos del Aeródromo, Las Palmas-Gran Canaria.

Barton, D. K., & Leonov, S. A. (1998). *Radar Technology Eyclopedia*. Artech House, Inc.

Blake, L. V. (1972). *Calculation of the Radar Cross Section of a Perfectly Sphere*. Whashington, D.C.

Casals, J. M. (1991). *Sección recta de blancos radar complejos en tiempo real*. Barcelona.

Chatzigeorgiadis, F. (2004). *Development of code for a physical optics radar cross section prediction and analysis application*. Monterrey, California.

Díaz, M. A. (2005). *Modelado de un radar doppler de pulsos (PDR)*. Tijuana.

Díaz, V., & Gómez, J. M. (2011). Análisis de Métodos de Evaluación de la Sección Transversal de Radar y de los Parámetros que inciden en Ella para Buques de Superficie. 11.

Knott, E. F., Tuley, M. T., & Shaeffer, J. F. (2004). *Radar Cross Section* (Segunda edición ed.). SciTech Publishing Inc.

Mahafza, B. R. (2013). *Radar system analysis and design using MATLAB*. Boca Ratón: CRC Press.

Martí, E. G., & Galera, J. L. (2009). *Sistemas de Radar para control de tráfico, detección e inhibición de la señal*.

Otermin. Etayo, I. (2007). *ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS PARQUES EÓLICOS EN LA PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS, Y EN LA PRESTACIÓN DE SERVICIO DE SISTEMAS TERRENALES DE RADIO-NAVEGACIÓN AÉREA CERCANOS*. Pamplona.

Pogemiller, J. A., Chu, C.-C., & Gebre-Egziabher, D. (s.f.). A GPS Bistatic Radar for Small Satellite Applications. *23rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites* .

Rodríguez. Olatz, et al. (2010). *CARACTERIZACIÓN DE LA SECCIÓN RADAR DE AEROGENERADORES*. PAÍS VASCO.

Ruck, G. T. (1970). *Radar Cross Section Handbook*. New York: Plenum Press.

Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2008). *Física para Ciencias e Ingeniería con Física Moderna*. México: CENGAGE Learning.

Skolnik, M. I. (2008). *Radar Handbook*. United States of America: Mc Graw Hill.

ANEXOS

ANEXO A. Ubicación del Transmisor respecto al origen de las coordenadas absolutas

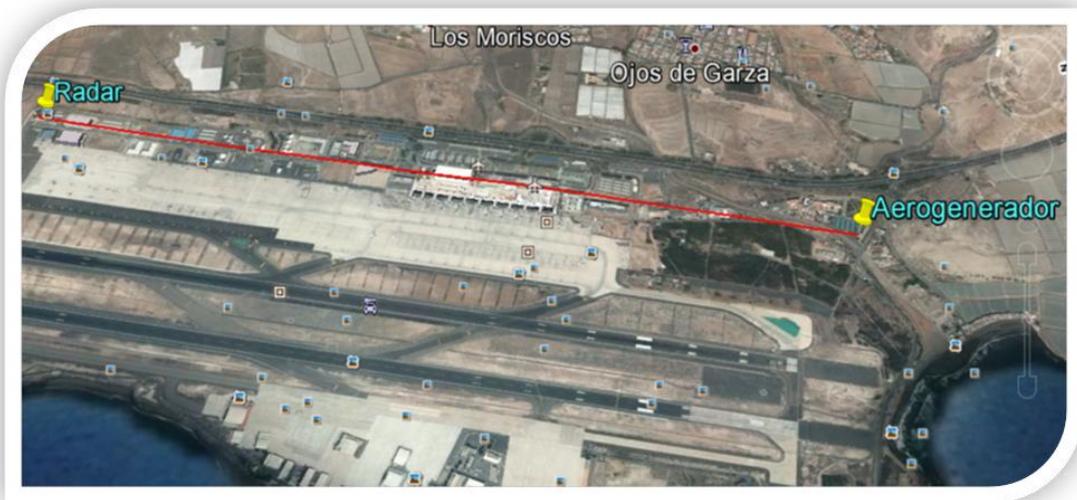
Tomando como referencia el mapa de la Isla y el AIP para el Aeropuerto La Palma (GCLP- Nomenclatura OACI), se establece la distancia del transmisor al objeto y las coordenadas de Re utilizados en el análisis para encontrar los valores de la RCS, de esta manera los resultados obtenidos son más aproximados. Los datos tomados desde el AIP España son los siguientes:

Figura 49. Obstáculos de Aeródromo

Descripción	Coordenadas	Elevación (M)
Radar	27°55'28.7"N 15°23'45.2"W	74
Aerogenerador	27°56'53.3"N 15°23'06.8"W	79

A partir de allí, se exportan las coordenadas a la aplicación Google Earth® y se determina la ubicación real del Radar del Aeropuerto La Palma y de un aerogenerador que es obstáculo de dicho aeropuerto. La separación relativa entre transmisor y aerogenerador se observa en la siguiente imagen:

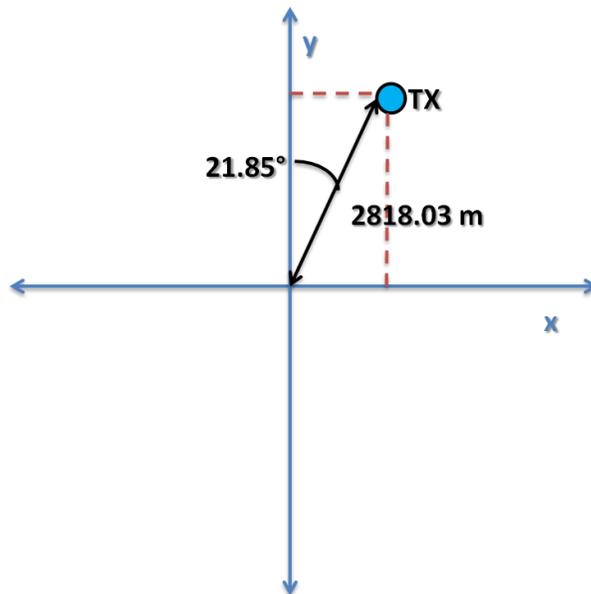
Figura 50. Ubicación real del Transmisor y el objeto



Fuente: Google Earth® (Consultado el 18 de Julio de 2013)

Introduciendo las coordenadas encontradas en el AIP se obtiene así la distancia desde el transmisor al objeto, suponiendo que el objeto se encuentra en el centro del plano cartesiano.

Figura 51. Distancia relativa entre Radar y Aerogenerador (Rto)



De esta manera Re es un punto fijo ubicado en [3036.14 7571.73 74].

ANEXO B. Algoritmo para cambio de coordenadas

Función para el cambio de coordenadas

```
function R=cc(ro, mu, Ra)
    Rr=Ra-ro;
    k=mu;
    if mu(1)==0 && mu(2)==0 & norm(mu)==1
        k2=[0 -1 0];
    else
        k2=k; k2(3)=0; k2=k2/norm(k2); %k2 es un vector unitario
    end
    i=cross([0 0 1], k2);
    j=cross(k,i);
    xr=dot(Rr, i);
    yr=dot(Rr, j);
    zr=dot(Rr, k);
    R=[xr yr zr];
```

ANEXO C. Algoritmos en Matlab para el disco

Función para RCS del disco

```
function RCS_disco=f_RCS_disco(a,Ro,Re,lambda)
    xo=Ro(1); yo=Ro(2); zo=Ro(3);
    xe=Re(1); ye=Re(2); ze=Re(3);

    % Nomenclatura

    % a= radio del disco
    % lambda= longitud de onda
    % Rto= Distancia entre transmisor y objeto [m]

    %constantes
    e=2.71828;%euler
    pi=3.1415;%número pi

    k=2*pi/lambda;
    d=2*a;

    He=(ze*sqrt((xe-xo)^2+(ye-yo)^2))/(ze+zo);
    Ho=(zo*He)/ze;
    u=[(xo-xe)/(Ho+He), (yo-ye)/(Ho+He), 0];
    Vref=[xe ye 0]+u*He;
    xref=Vref(1); yref=Vref(2); zref=Vref(3);
    norma_Vref=norm(Vref);

    if norma_Vref<=a;
        beta=acos(((Re-Vref)*[0 0 1]')/sqrt((xe-xref)^2+(ye-yref)^2+(ze-
zref)^2));
        RCS_disco_1=16*pi*(abs((pi*a^2*cos(beta/2)*besselJ(1,k*d*sin(beta/2)))/(1
ambda*k*d*sin(beta/2))))^2;
        RCS_disco=10*log10(RCS_disco_1)
    else
        RCS_disco=0;
    end
end
```

RCS del disco con variación de la frecuencia

```
%RCS del disco con variación en la frecuencia

clear all; close all; clc;

c=3e8;
```

```

a=46.5;
ro=[0 0 80]; mu=[1 0 0];
Re=[3036.14 7571.73 74];

%RCS para cada frecuencia y cada posición del receptor
vfi=0:0.01:2*pi; Ru=100;
for f=1e9
    lambda=c/f; %En m
    for i=1:length(vfi)
        fi=vfi(i);
        Ro=[Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50];
        Ro_rel=cc(ro, mu, Ro); Re_rel=cc(ro,mu,Re);
        RCS_placa_1(i)=f_RCS_disco(a,Ro_rel,Re_rel,lambda);
    end
end

hold on

for f=1.25e9
    lambda=c/f; %En m
    for i=1:length(vfi)
        fi=vfi(i);
        Ro=[Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50];
        Ro_rel=cc(ro, mu, Ro); Re_rel=cc(ro,mu,Re);
        RCS_placa_2(i)=f_RCS_disco(a,Ro_rel,Re_rel,lambda);
    end
end

for f=1.5e9
    lambda=c/f; %En m
    for i=1:length(vfi)
        fi=vfi(i);
        Ro=[Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50];
        Ro_rel=cc(ro, mu, Ro); Re_rel=cc(ro,mu,Re);
        RCS_placa_3(i)=f_RCS_disco(a,Ro_rel,Re_rel,lambda);
    end
end

for f=1.75e9
    lambda=c/f; %En m
    for i=1:length(vfi)
        fi=vfi(i);
        Ro=[Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50];
        Ro_rel=cc(ro, mu, Ro); Re_rel=cc(ro,mu,Re);
        RCS_placa_4(i)=f_RCS_disco(a,Ro_rel,Re_rel,lambda);
    end
end

for f=2e9
    lambda=c/f; %En m
    for i=1:length(vfi)
        fi=vfi(i);

```

```

        Ro=[Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50];
        Ro_rel=cc(ro, mu, Ro); Re_rel=cc(ro,mu,Re);
        RCS_placa_5(i)=f_RCS_discō(a,Ro_rel,Re_rel,lambda);
    end
end

%Gráfica
figure(1),plot(vfi*180/pi,RCS_placa_1,'c',vfi*180/pi,RCS_placa_2,'g',vfi*
180/pi,RCS_placa_3,'b',vfi*180/pi,RCS_placa_4,'k',vfi*180/pi,RCS_placa_5,
'r');
grid on;
xlabel('Ángulo fi (grados)');
ylabel('RCS (dBsm)');
title('RCS del disco vs. Ubicación del receptor');
set(gca,'xlim',[0 360]);
legend('f=1GHz','f=1.25GHz','f=1.5GHz','f=1.75GHz','f=2GHz')

```

RCS del disco con variación de Ru

```

%RCS del disco con variación de Ru

clear all; close all; clc;

c=3e8;

a=46.5;
ro=[0 0 80]; mu=[1 0 0];
Re=[3036.14 7571.73 74];
f=1e9
lambda=c/f; %En m

%RCS para cada frecuencia y cada posición del receptor
vfi=0:0.01:2*pi;
for Ru=30
    for i=1:length(vfi)
        fi=vfi(i);
        Ro=[Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50];
        Ro_rel=cc(ro, mu, Ro); Re_rel=cc(ro,mu,Re);
        RCS_placa_1(i)=f_RCS_discō(a,Ro_rel,Re_rel,lambda);
    end
end

hold on

for Ru=272.5
    for i=1:length(vfi)
        fi=vfi(i);
        Ro=[Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50];
        Ro_rel=cc(ro, mu, Ro); Re_rel=cc(ro,mu,Re);
        RCS_placa_2(i)=f_RCS_discō(a,Ro_rel,Re_rel,lambda);
    end
end

```

```

end

for Ru=515
    for i=1:length(vfi)
        fi=vfi(i);
        Ro=[Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50];
        Ro_rel=cc(ro, mu, Ro); Re_rel=cc(ro,mu,Re);
        RCS_placa_3(i)=f_RCS_disco(a,Ro_rel,Re_rel,lambda);
    end
end

for Ru=757.5
    for i=1:length(vfi)
        fi=vfi(i);
        Ro=[Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50];
        Ro_rel=cc(ro, mu, Ro); Re_rel=cc(ro,mu,Re);
        RCS_placa_4(i)=f_RCS_disco(a,Ro_rel,Re_rel,lambda);
    end
end

for Ru=1000
    for i=1:length(vfi)
        fi=vfi(i);
        Ro=[Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50];
        Ro_rel=cc(ro, mu, Ro); Re_rel=cc(ro,mu,Re);
        RCS_placa_5(i)=f_RCS_disco(a,Ro_rel,Re_rel,lambda);
    end
end

%Gráfica

figure(1),plot(vfi*180/pi,RCS_placa_1,'c',vfi*180/pi,RCS_placa_2,'g',vfi*
180/pi,RCS_placa_3,'b',vfi*180/pi,RCS_placa_4,'k',vfi*180/pi,RCS_placa_5,
'r');
grid on;
xlabel('Ángulo fi (grados)');
ylabel('RCS (dBsm)');
title ('RCS del disco vs. Ubicación del receptor');
set(gca,'xlim',[0 360]);
legend('Ru=30m','Ru=272.5m','Ru=515m','Ru=757.5m','Ru=1000m');

```

ANEXO D. Algoritmos en Matlab para el cilindro

Función RCS del cilindro

```
function RCS=f_RCS_Cilindro(L,a,Ro, Re, lambda)
    xo=Ro(1); yo=Ro(2); zo=Ro(3); do=norm(Ro);
    xe=Re(1); ye=Re(2); ze=Re(3); Rto=norm(Re);

    % Nomenclatura
    % theta_i & fi_i: dirección de propagación de la onda incidente
    % theta_s & fi_s: dirección de propagación de la onda reflejada
    % L= longitud del cilindro
    % a= radio del cilindro
    % lambda= longitud de onda
    % Rto= Distancia entre transmisor y objeto [m]
    % y= Desfase de la onda entre transmisor y receptor

    %constantes
    e=2.71828;%euler
    pi=3.1415;%número pi

    theta_i=acos(ze/Rto);
    fi_i=atan2(ye,xe);
    fi_s=atan2(yo,xo);

    y=2*pi*Rto/lambda;
    k=2*pi/lambda;

    theta_s=acos(zo/do);
    ax=sin(y)*cos(theta_i)*cos(fi_i)-cos(y)*sin(theta_i)*cos(fi_i);
    ay=sin(y)*cos(theta_i)*sin(fi_i)+cos(y)*sin(theta_i)*cos(fi_i);
    az=-sin(y)*sin(theta_i)+cos(y)*cos(theta_i);
    A=sin(theta_i)*cos(fi_i)+sin(theta_s)*cos(fi_s);
    B=sin(theta_i)*sin(fi_i)+sin(theta_s)*sin(fi_s);
    D=cos(theta_i)+cos(theta_s);

    G1=A*(ay*sin(theta_s)*sin(fi_s)+az*cos(theta_s))-
    B*(ax*sin(theta_s)*sin(fi_s));

    G2=az*sin(theta_s)*(A*cos(fi_s)+B*sin(fi_s));

    G3=B*(ax*sin(theta_s)*cos(fi_s)+az*cos(theta_s))-
    A*(ay*sin(theta_s)*sin(fi_s));

    %calculando la RCS en m^2
    i=sqrt(-1);
```

```

RCS_1=( (a^4*lambda*(abs(e^(i*k*D*L)-
1))^2)/(pi*D^2*((A^2+B^2)*a^2)^(3/2)))*(G1^2+G2^2+G3^2);
RCS=10*log10(RCS_1)

```

RCS del cilindro con variación de la frecuencia

```

% Nomenclatura
% theta_i & fi_i: dirección de propagación del la onda incidente
% theta_s & fi_s: dirección de propagación de la onda reflejada
% L= longitud del cilindro
% a= radio del cilindro
% lambda= longitud de onda
% Rto= Distancia entre transmisor y objeto [m]
% y=Desfase de la onda entre transmisor y receptor
% c=velocidad de la luz en el vacío
% f=frecuencia en Hz

%constantes
%clear all; close all;

L=80; %En m
a=4.5; %En m
c=3e8; %En m/s

% f=1e9; %Hz
% lambda=c/f;

ro=[0 0 L/2]; mu=[0 0 1];
Re=[3036.14 7571.73 74];

%Mover el receptor horizontalmente cambiando el ángulo, para una altura
z=0
vfi=0:0.001:2*pi; Ru=50;

for f=1e9
    lambda=c/f;
    for i=1:length(vfi)
        fi=vfi(i);
        Ro=[Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50]; %Estas posiciones estan en
        coordenadas relativas
        Ro_rel=cc(ro, mu, Ro); Re_rel=cc(ro,mu,Re);
        RCS_cilindro_1(i)=f_RCS_Cilindro(L,a,Ro_rel, Re_rel, lambda);
    end
end

hold on

for f=1.25e9
    lambda=c/f;
    for i=1:length(vfi)
        fi=vfi(i);

```

```

        Ro=[Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50];    %Estas posiciones estan en
coordenadas relativas
        Ro_rel=cc(ro, mu, Ro); Re_rel=cc(ro,mu,Re);
        RCS_cilindro_2(i)=f_RCS_Cilindro(L,a,Ro_rel, Re_rel, lambda);
    end
end

for f=1.5e9
    lambda=c/f;
    for i=1:length(vfi)
        fi=vfi(i);
        Ro=[Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50];    %Estas posiciones estan en
coordenadas relativas
        Ro_rel=cc(ro, mu, Ro); Re_rel=cc(ro,mu,Re);
        RCS_cilindro_3(i)=f_RCS_Cilindro(L,a,Ro_rel, Re_rel, lambda);
    end
end

for f=1.75e9
    lambda=c/f;
    for i=1:length(vfi)
        fi=vfi(i);
        Ro=[Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50];    %Estas posiciones estan en
coordenadas relativas
        Ro_rel=cc(ro, mu, Ro); Re_rel=cc(ro,mu,Re);
        RCS_cilindro_4(i)=f_RCS_Cilindro(L,a,Ro_rel, Re_rel, lambda);
    end
end

for f=2e9
    lambda=c/f;
    for i=1:length(vfi)
        fi=vfi(i);
        Ro=[Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50];    %Estas posiciones estan en
coordenadas relativas
        Ro_rel=cc(ro, mu, Ro); Re_rel=cc(ro,mu,Re);
        RCS_cilindro_5(i)=f_RCS_Cilindro(L,a,Ro_rel, Re_rel, lambda);
    end
end

hold off

%Gráfica

figure(2),plot(vfi*180/pi,RCS_cilindro_1,'c',vfi*180/pi,RCS_cilindro_2,'g',
',vfi*180/pi,RCS_cilindro_3,'b',vfi*180/pi,RCS_cilindro_4,'k',vfi*180/pi,
RCS_cilindro_5,'r');
    grid on
    xlabel('Ángulo fi (grados)');
    ylabel('RCS (dBsm)');
    title ('RCS del cilindro vs. Ubicación del receptor');
    set(gca,'xlim',[0 360]);
    legend('f=1GHz','f=1.25GHz','f=1.5GHz','f=1.75GHz','f=2GHz')

```

RCS del cilindro con variación de Ru

```
% Nomenclatura
% theta_i & fi_i: dirección de propagación de la onda incidente
% theta_s & fi_s: dirección de propagación de la onda reflejada
% L= longitud del cilindro
% a= radio del cilindro
% lambda= longitud de onda
% Rto= Distancia entre transmisor y objeto [m]
% y=Desfase de la onda entre transmisor y receptor
%c=velocidad de la luz en el vacío
%f=frecuencia en Hz

%constantes
%clear all; close all;

L=80; %En m
a=4.5; %En m
c=3e8; %En m/s

f=1e9; %Hz
lambda=c/f;

ro=[0 0 L/2]; mu=[0 0 1];
Re=[3036.14 7571.73 74];

%Mover el receptor horizontalmente cambiando el ángulo, para una altura
z=0
vfi=0:0.001:2*pi;

for Ru=30
    for i=1:length(vfi)
        fi=vfi(i);
        Ro=[Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50]; %Estas posiciones estan en
        coordenadas relativas
        Ro_rel=cc(ro, mu, Ro); Re_rel=cc(ro,mu,Re);
        RCS_cilindro_1(i)=f_RCS_Cilindro(L,a,Ro_rel, Re_rel, lambda);
    end
end

hold on

for Ru=272.5
    for i=1:length(vfi)
        fi=vfi(i);
        Ro=[Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50]; %Estas posiciones estan en
        coordenadas relativas
        Ro_rel=cc(ro, mu, Ro); Re_rel=cc(ro,mu,Re);
        RCS_cilindro_2(i)=f_RCS_Cilindro(L,a,Ro_rel, Re_rel, lambda);
    end
end
```

```

for Ru=515
    for i=1:length(vfi)
        fi=vfi(i);
        Ro=[Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50];    %Estas posiciones estan en
        coordenadas relativas
        Ro_rel=cc(ro, mu, Ro); Re_rel=cc(ro,mu,Re);
        RCS_cilindro_3(i)=f_RCS_Cilindro(L,a,Ro_rel, Re_rel, lambda);
    end
end

for Ru=757.5
    for i=1:length(vfi)
        fi=vfi(i);
        Ro=[Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50];    %Estas posiciones estan en
        coordenadas relativas
        Ro_rel=cc(ro, mu, Ro); Re_rel=cc(ro,mu,Re);
        RCS_cilindro_4(i)=f_RCS_Cilindro(L,a,Ro_rel, Re_rel, lambda);
    end
end

for Ru=1000
    for i=1:length(vfi)
        fi=vfi(i);
        Ro=[Ru*cos(fi) Ru*sin(fi) 50];    %Estas posiciones estan en
        coordenadas relativas
        Ro_rel=cc(ro, mu, Ro); Re_rel=cc(ro,mu,Re);
        RCS_cilindro_5(i)=f_RCS_Cilindro(L,a,Ro_rel, Re_rel, lambda);
    end
end

hold off

%Gráfica

figure(2),plot(vfi*180/pi,RCS_cilindro_1,'c',vfi*180/pi,RCS_cilindro_2,'g',
vfi*180/pi,RCS_cilindro_3,'b',vfi*180/pi,RCS_cilindro_4,'k',vfi*180/pi,
RCS_cilindro_5,'r');
grid on
xlabel('Ángulo fi (grados)');
ylabel('RCS (dBsm)');
title ('RCS del cilindro vs. Ubicación del receptor');
set(gca,'xlim',[0 360]);
legend('Ru=30m','Ru=272.5m','Ru=515m','Ru=757.5m','Ru=1000m');

```

ANEXO E. Algoritmos para RCS de aerogeneradores

Función crear_aerogenerador

```
function data=crear_aerogenerador(a_cil, a_disco, L_cil, ro, mu, data)
    ro_cil=ro+[0 0 L_cil/2];
    ro_disco=ro+[0 0 L_cil+a_disco];
    mu_cil=[0 0 1];
    mu_disco=mu;

    %Creacion del disco
    tmp.a=a_disco; tmp.L=0; tmp.mu=mu_disco; tmp.ro=ro_disco;
    tmp.tipo='disco';
    data=[data tmp];    %Acabo de agregar el disco al vector de objetos

    %Creacion del cilindro
    tmp.a=a_cil; tmp.L=L_cil; tmp.mu=mu_cil; tmp.ro=ro_cil;
    tmp.tipo='cilindro';
    data=[data tmp];    %Acabo de agregar el disco al vector de objetos
```

RCS del aerogenerador vs. Altura del receptor con variación de la frecuencia

```
tic
%Definición de los aerogeneradores
data=[];
for x=0
    for y=0
        data=crear_aerogenerador(4, 46.5, 80-46.5, [x y 0], [0 1 0],
data);
    end
end
Nobj=length(data);    %Numero de objetos a analizar

%Definición del emisor
Re=[3036.14 7571.73 74];
Ro=[];
f=1.5;
for z=0:1:2000
    Ro=[Ro; 0 0 z];
end
Nobs=size(Ro,1);    %Numero de observadores a analizar

%Parámetro de los cálculos
c=3e8;

RCS=zeros(Nobs,1);
for f=1e9;
```

```

lambda=c/f;
for i=1:Nobs %Para cada uno de los observadores
    for j=1:Nobj
        Re_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Re); %Posición relativa
del emisor respecto al objeto
        Ro_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Ro(i,:)); %Posición
relativa del Observador respecto al objeto
        if strcmp(data(j).tipo, 'disco')==1 %El objeto es un
disco
            RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_disco(data(j).a, Ro_rel, Re_rel,
lambda);
        else
            RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_cilindro(data(j).L, data(j).a,
Ro_rel, Re_rel, lambda);
        end
    end
end
RCSdBsm1=10*log10(RCS);
end

hold on

for f=1.25e9;
    lambda=c/f;
    for i=1:Nobs %Para cada uno de los observadores
        for j=1:Nobj
            Re_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Re); %Posición relativa
del emisor respecto al objeto
            Ro_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Ro(i,:)); %Posición
relativa del Observador respecto al objeto
            if strcmp(data(j).tipo, 'disco')==1 %El objeto es un
disco
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_disco(data(j).a, Ro_rel, Re_rel,
lambda);
            else
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_cilindro(data(j).L, data(j).a,
Ro_rel, Re_rel, lambda);
            end
        end
    end
    RCSdBsm2=10*log10(RCS);
end

for f=1.5e9;
    lambda=c/f;
    for i=1:Nobs %Para cada uno de los observadores
        for j=1:Nobj
            Re_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Re); %Posición relativa
del emisor respecto al objeto
            Ro_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Ro(i,:)); %Posición
relativa del Observador respecto al objeto
            if strcmp(data(j).tipo, 'disco')==1 %El objeto es un
disco

```

```

                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_disco(data(j).a, Ro_rel, Re_rel,
lambda);
            else
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_cilindro(data(j).L, data(j).a,
Ro_rel, Re_rel, lambda);
            end
        end
    end
    RCSdBsm3=10*log10(RCS);
end

for f=1.75e9;
    lambda=c/f;
    for i=1:Nobs %Para cada uno de los observadores
        for j=1:Nobj
            Re_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Re); %Posición relativa
del emisor respecto al objeto
            Ro_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Ro(i,:)); %Posición
relativa del Observador respecto al objeto
            if strcmp(data(j).tipo, 'disco')==1 %El objeto es un
disco
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_disco(data(j).a, Ro_rel, Re_rel,
lambda);
            else
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_cilindro(data(j).L, data(j).a,
Ro_rel, Re_rel, lambda);
            end
        end
    end
    RCSdBsm4=10*log10(RCS);
end

for f=2e9;
    lambda=c/f;
    for i=1:Nobs %Para cada uno de los observadores
        for j=1:Nobj
            Re_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Re); %Posición relativa
del emisor respecto al objeto
            Ro_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Ro(i,:)); %Posición
relativa del Observador respecto al objeto
            if strcmp(data(j).tipo, 'disco')==1 %El objeto es un
disco
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_disco(data(j).a, Ro_rel, Re_rel,
lambda);
            else
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_cilindro(data(j).L, data(j).a,
Ro_rel, Re_rel, lambda);
            end
        end
    end
    RCSdBsm5=10*log10(RCS);
end

hold off

```

```

%Gráfica
figure(2); plot(Ro(:,3), RCSdBsm1, 'm', Ro(:,3), RCSdBsm2, 'y', Ro(:,3),
RCSdBsm3, 'g', Ro(:,3), RCSdBsm4, 'b', Ro(:,3), RCSdBsm5, 'c'); grid on;
xlabel('Altura del receptor (m)');
ylabel('RCS (dBsm)');
title ('RCS del conjunto de aerogeneradores vs. Ubicación del receptor');
legend('f=1GHz', 'f=1.25GHz', 'f=1.5GHz', 'f=1.75GHz', 'f=2GHz');

toc

```

RCS del aerogenerador ubicado simétricamente respecto a TX y RX vs. Ubicación del receptor con variación de la frecuencia

```

tic
%Definición de los aerogeneradores
data=[];
for x=3036.14
    for y=3785.865
        data=crear_aerogenerador(4, 46.5, 80-46.5, [x y 0], [0 1 0],
data);
    end
end
Nobj=length(data);           %Numero de objetos a analizar

%Definición del emisor
Re=[3036.14 7571.73 0];
Ro=[];
for z=-2000:1:2000
    Ro=[Ro; 3036.14 0 z];
end
Nobs=size(Ro,1);           %Numero de observadores a analizar

%Parámetro de los cálculos
c=3e8;

RCS=zeros(Nobs,1);
for f=1e9;
    lambda=c/f;
    for i=1:Nobs %Para cada uno de los observadores
        for j=1:Nobj
            Re_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Re); %Posición relativa
del emisor respecto al objeto
            Ro_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Ro(i,:)); %Posición
relativa del Observador respecto al objeto
            if strcmp(data(j).tipo, 'disco')==1 %El objeto es un
disco
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_disco(data(j).a, Ro_rel, Re_rel,
lambda);
            end
        end
    end
end

```

```

                else
                    RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_cilindro(data(j).L, data(j).a,
Ro_rel, Re_rel, lambda);
                end
            end
            end
            RCSdBsm1=10*log10(RCS);
        end

hold on

for f=1.25e9;
    lambda=c/f;
    for i=1:Nobs %Para cada uno de los observadores
        for j=1:Nobj
            Re_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Re); %Posición relativa
del emisor respecto al objeto
            Ro_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Ro(i,:)); %Posición
relativa del Observador respecto al objeto
            if strcmp(data(j).tipo, 'disco')==1 %El objeto es un
disco
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_disco(data(j).a, Ro_rel, Re_rel,
lambda);
            else
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_cilindro(data(j).L, data(j).a,
Ro_rel, Re_rel, lambda);
            end
        end
        end
        RCSdBsm2=10*log10(RCS);
    end

for f=1.5e9;
    lambda=c/f;
    for i=1:Nobs %Para cada uno de los observadores
        for j=1:Nobj
            Re_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Re); %Posición relativa
del emisor respecto al objeto
            Ro_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Ro(i,:)); %Posición
relativa del Observador respecto al objeto
            if strcmp(data(j).tipo, 'disco')==1 %El objeto es un
disco
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_disco(data(j).a, Ro_rel, Re_rel,
lambda);
            else
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_cilindro(data(j).L, data(j).a,
Ro_rel, Re_rel, lambda);
            end
        end
        end
        RCSdBsm3=10*log10(RCS);
    end

for f=1.75e9;

```

```

    lambda=c/f;
    for i=1:Nobs %Para cada uno de los observadores
        for j=1:Nobj
            Re_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Re); %Posición relativa
del emisor respecto al objeto
            Ro_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Ro(i,:)); %Posición
relativa del Observador respecto al objeto
            if strcmp(data(j).tipo, 'disco')==1 %El objeto es un
disco
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_disco(data(j).a, Ro_rel, Re_rel,
lambda);
            else
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_cilindro(data(j).L, data(j).a,
Ro_rel, Re_rel, lambda);
            end
        end
    end
    RCSdBsm4=10*log10(RCS);
end

for f=2e9;
    lambda=c/f;
    for i=1:Nobs %Para cada uno de los observadores
        for j=1:Nobj
            Re_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Re); %Posición relativa
del emisor respecto al objeto
            Ro_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Ro(i,:)); %Posición
relativa del Observador respecto al objeto
            if strcmp(data(j).tipo, 'disco')==1 %El objeto es un
disco
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_disco(data(j).a, Ro_rel, Re_rel,
lambda);
            else
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_cilindro(data(j).L, data(j).a,
Ro_rel, Re_rel, lambda);
            end
        end
    end
    RCSdBsm5=10*log10(RCS);
end

hold off

%Gráfica
figure(2); plot(Ro(:,3), RCSdBsm1, 'm', Ro(:,3), RCSdBsm2, 'y', Ro(:,3),
RCSdBsm3, 'g', Ro(:,3), RCSdBsm4, 'b', Ro(:,3), RCSdBsm5, 'c'); grid on;
xlabel('Altura del receptor (m)');
ylabel('RCS (dBsm)');
title ('RCS del aerogenerador vs. Ubicación del receptor');
legend('f=1GHz', 'f=1.25GHz', 'f=1.5GHz', 'f=1.75GHz', 'f=2GHz');

toc

```

RCS del conjunto de aerogeneradores vs. Altura del receptor con variación de la frecuencia (27 aerogeneradores)

```
tic
%Definición de los aerogeneradores
data=[];
for x=5000:250:5500
    for y=0:250:2000
        data=crear_aerogenerador(4, 46.5, 80-46.5, [x y 0], [0 1 0],
data);
    end
end
Nobj=length(data);           %Numero de objetos a analizar

%Definición del emisor
Re=[3036.14 7571.73 74];
Ro=[];
f=1.5;
for z=0:1:2000
    Ro=[Ro; 0 0 z];
end
Nobs=size(Ro,1);           %Numero de observadores a analizar

%Parámetro de los cálculos
c=3e8;

RCS=zeros(Nobs,1);
for f=1e9;
    lambda=c/f;
    for i=1:Nobs %Para cada uno de los observadores
        for j=1:Nobj
            Re_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Re); %Posición relativa
del emisor respecto al objeto
            Ro_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Ro(i,:)); %Posición
relativa del Observador respecto al objeto
            if strcmp(data(j).tipo, 'disco')==1 %El objeto es un
disco
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_disco(data(j).a, Ro_rel, Re_rel,
lambda);
            else
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_cilindro(data(j).L, data(j).a,
Ro_rel, Re_rel, lambda);
            end
        end
    end
    RCSdBsm1=10*log10(RCS);
end
```

```

hold on

for f=1.25e9;
    lambda=c/f;
    for i=1:Nobs %Para cada uno de los observadores
        for j=1:Nobj
            Re_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Re); %Posición relativa
del emisor respecto al objeto
            Ro_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Ro(i,:)); %Posición
relativa del Observador respecto al objeto
            if strcmp(data(j).tipo, 'disco')==1 %El objeto es un
disco
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_disco(data(j).a, Ro_rel, Re_rel,
lambda);
            else
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_cilindro(data(j).L, data(j).a,
Ro_rel, Re_rel, lambda);
            end
        end
    end
    RCSdBsm2=10*log10(RCS);
end

for f=1.5e9;
    lambda=c/f;
    for i=1:Nobs %Para cada uno de los observadores
        for j=1:Nobj
            Re_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Re); %Posición relativa
del emisor respecto al objeto
            Ro_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Ro(i,:)); %Posición
relativa del Observador respecto al objeto
            if strcmp(data(j).tipo, 'disco')==1 %El objeto es un
disco
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_disco(data(j).a, Ro_rel, Re_rel,
lambda);
            else
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_cilindro(data(j).L, data(j).a,
Ro_rel, Re_rel, lambda);
            end
        end
    end
    RCSdBsm3=10*log10(RCS);
end

for f=1.75e9;
    lambda=c/f;
    for i=1:Nobs %Para cada uno de los observadores
        for j=1:Nobj
            Re_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Re); %Posición relativa
del emisor respecto al objeto
            Ro_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Ro(i,:)); %Posición
relativa del Observador respecto al objeto
            if strcmp(data(j).tipo, 'disco')==1 %El objeto es un
disco

```

```

        RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_disco(data(j).a, Ro_rel, Re_rel,
lambda);
        else
            RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_cilindro(data(j).L, data(j).a,
Ro_rel, Re_rel, lambda);
        end
    end
end
RCSdBsm4=10*log10(RCS);
end

for f=2e9;
    lambda=c/f;
    for i=1:Nobs %Para cada uno de los observadores
        for j=1:Nobj
            Re_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Re); %Posición relativa
del emisor respecto al objeto
            Ro_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Ro(i,:)); %Posición
relativa del Observador respecto al objeto
            if strcmp(data(j).tipo, 'disco')==1 %El objeto es un
disco
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_disco(data(j).a, Ro_rel, Re_rel,
lambda);
            else
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_cilindro(data(j).L, data(j).a,
Ro_rel, Re_rel, lambda);
            end
        end
    end
    RCSdBsm5=10*log10(RCS);
end

hold off

%Gráfica
figure(2); plot(Ro(:,3), RCSdBsm1, 'm', Ro(:,3), RCSdBsm2, 'y', Ro(:,3),
RCSdBsm3, 'g', Ro(:,3), RCSdBsm4, 'b', Ro(:,3), RCSdBsm5, 'c'); grid on;
xlabel('Altura del receptor (m)');
ylabel('RCS (dBsm)');
title('RCS del conjunto de aerogeneradores vs. Ubicación del receptor');
legend('f=1GHz', 'f=1.25GHz', 'f=1.5GHz', 'f=1.75GHz', 'f=2GHz');

toc

```

RCS del conjunto de aerogeneradores vs. Altura del receptor con variación de la frecuencia (51 aerogeneradores)

```
tic
%Definición de los aerogeneradores
data=[];
for x=5000:250:5500
    for y=-2000:250:2000
        data=crear_aerogenerador(4, 46.5, 80-46.5, [x y 0], [0 1 0],
data);
    end
end
Nobj=length(data);          %Numero de objetos a analizar

%Definición del emisor
Re=[3036.14 7571.73 74];
Ro=[];
f=1.5;
for z=0:1:2000
    Ro=[Ro; 0 0 z];
end
Nobs=size(Ro,1);          %Numero de observadores a analizar

%Parámetro de los cálculos
c=3e8;

RCS=zeros(Nobs,1);
for f=1e9;
    lambda=c/f;
    for i=1:Nobs %Para cada uno de los observadores
        for j=1:Nobj
            Re_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Re); %Posición relativa
del emisor respecto al objeto
            Ro_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Ro(i,:)); %Posición
relativa del Observador respecto al objeto
            if strcmp(data(j).tipo, 'disco')==1 %El objeto es un
disco
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_disco(data(j).a, Ro_rel, Re_rel,
lambda);
            else
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_cilindro(data(j).L, data(j).a,
Ro_rel, Re_rel, lambda);
            end
        end
    end
    RCSdBsm1=10*log10(RCS);
end

hold on
```

```

for f=1.25e9;
    lambda=c/f;
    for i=1:Nobs %Para cada uno de los observadores
        for j=1:Nobj
            Re_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Re); %Posición relativa
del emisor respecto al objeto
            Ro_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Ro(i,:)); %Posición
relativa del Observador respecto al objeto
            if strcmp(data(j).tipo, 'disco')==1 %El objeto es un
disco
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_disco(data(j).a, Ro_rel, Re_rel,
lambda);
            else
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_cilindro(data(j).L, data(j).a,
Ro_rel, Re_rel, lambda);
            end
        end
    end
    RCSdBsm2=10*log10(RCS);
end

for f=1.5e9;
    lambda=c/f;
    for i=1:Nobs %Para cada uno de los observadores
        for j=1:Nobj
            Re_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Re); %Posición relativa
del emisor respecto al objeto
            Ro_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Ro(i,:)); %Posición
relativa del Observador respecto al objeto
            if strcmp(data(j).tipo, 'disco')==1 %El objeto es un
disco
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_disco(data(j).a, Ro_rel, Re_rel,
lambda);
            else
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_cilindro(data(j).L, data(j).a,
Ro_rel, Re_rel, lambda);
            end
        end
    end
    RCSdBsm3=10*log10(RCS);
end

for f=1.75e9;
    lambda=c/f;
    for i=1:Nobs %Para cada uno de los observadores
        for j=1:Nobj
            Re_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Re); %Posición relativa
del emisor respecto al objeto
            Ro_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Ro(i,:)); %Posición
relativa del Observador respecto al objeto
            if strcmp(data(j).tipo, 'disco')==1 %El objeto es un
disco
                RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_disco(data(j).a, Ro_rel, Re_rel,
lambda);

```

```

                else
                    RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_cilindro(data(j).L, data(j).a,
Ro_rel, Re_rel, lambda);
                end
            end
        end
        RCSdBsm4=10*log10(RCS);
    end

    for f=2e9;
        lambda=c/f;
        for i=1:Nobs %Para cada uno de los observadores
            for j=1:Nobj
                Re_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Re); %Posición relativa
del emisor respecto al objeto
                Ro_rel=cc(data(j).ro, data(j).mu, Ro(i,:)); %Posición
relativa del Observador respecto al objeto
                if strcmp(data(j).tipo, 'disco')==1 %El objeto es un
disco
                    RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_disco(data(j).a, Ro_rel, Re_rel,
lambda);
                else
                    RCS(i)=RCS(i)+f_RCS_cilindro(data(j).L, data(j).a,
Ro_rel, Re_rel, lambda);
                end
            end
        end
        RCSdBsm5=10*log10(RCS);
    end

    hold off

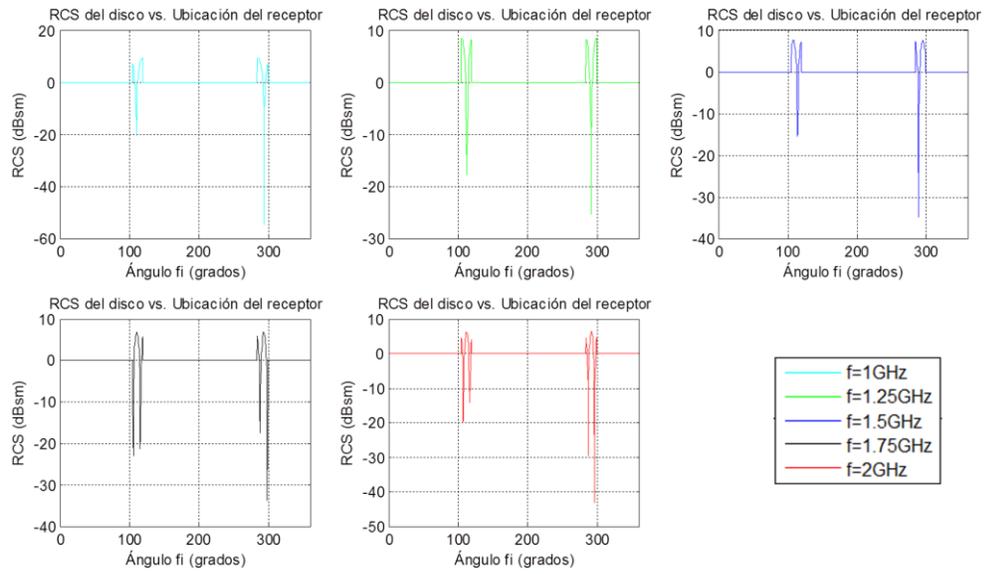
    %Gráfica
    figure(2); plot(Ro(:,3), RCSdBsm1, 'm', Ro(:,3), RCSdBsm2, 'y', Ro(:,3),
RCSdBsm3, 'g', Ro(:,3), RCSdBsm4, 'b', Ro(:,3), RCSdBsm5, 'c'); grid on;
xlabel('Altura del receptor (m)');
ylabel('RCS (dBsm)');
title('RCS del conjunto de aerogeneradores vs. Ubicación del receptor');
legend('f=1GHz', 'f=1.25GHz', 'f=1.5GHz', 'f=1.75GHz', 'f=2GHz');

    toc

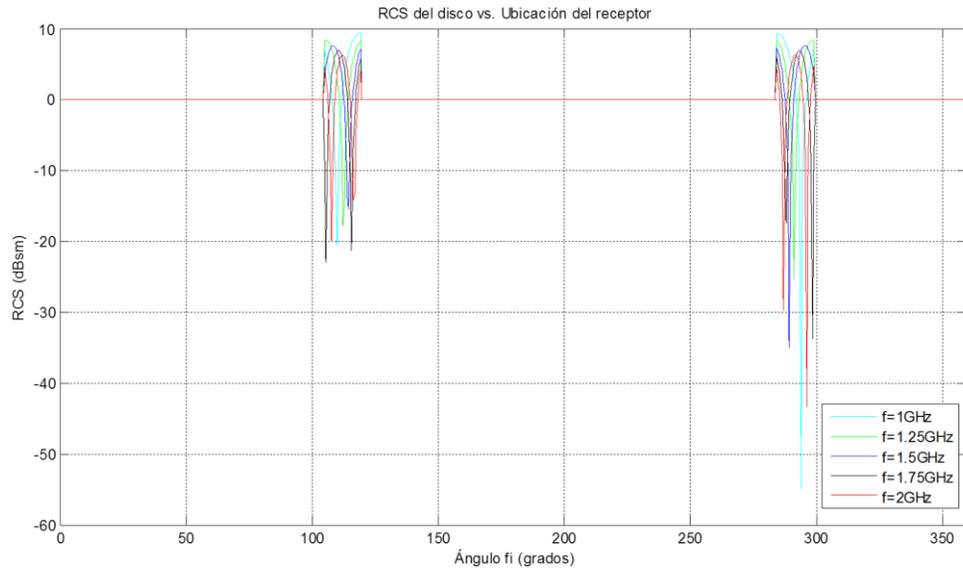
```

ANEXO F. Gráficas ampliadas

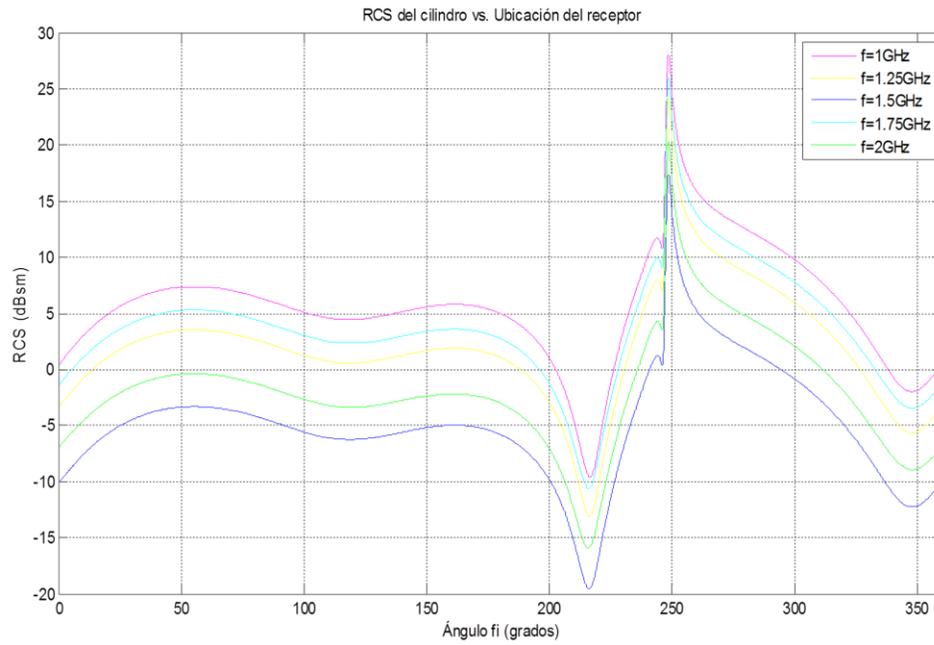
Gráfica individual RCS del disco vs. Ubicación del receptor variando frecuencia



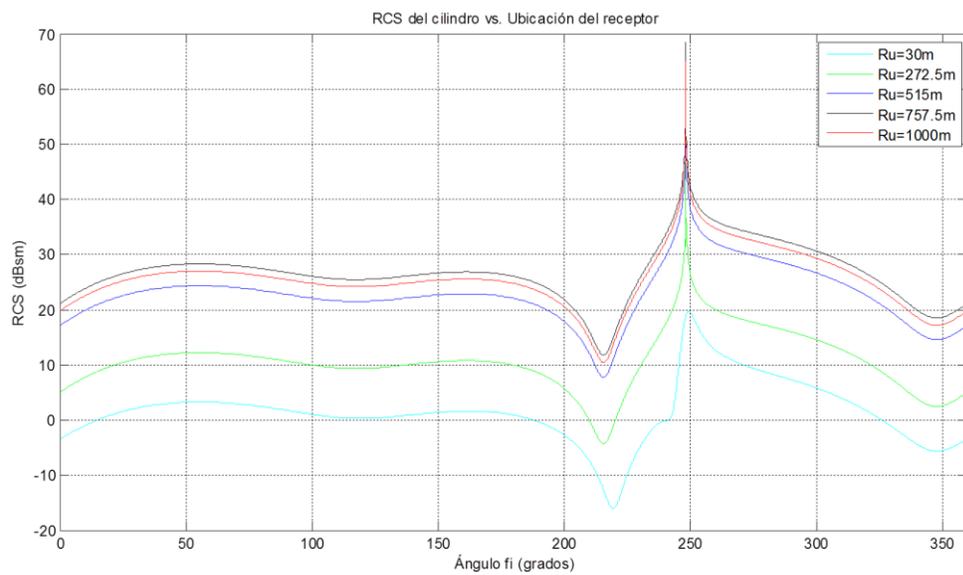
RCS del disco vs. Ubicación del receptor variando frecuencia



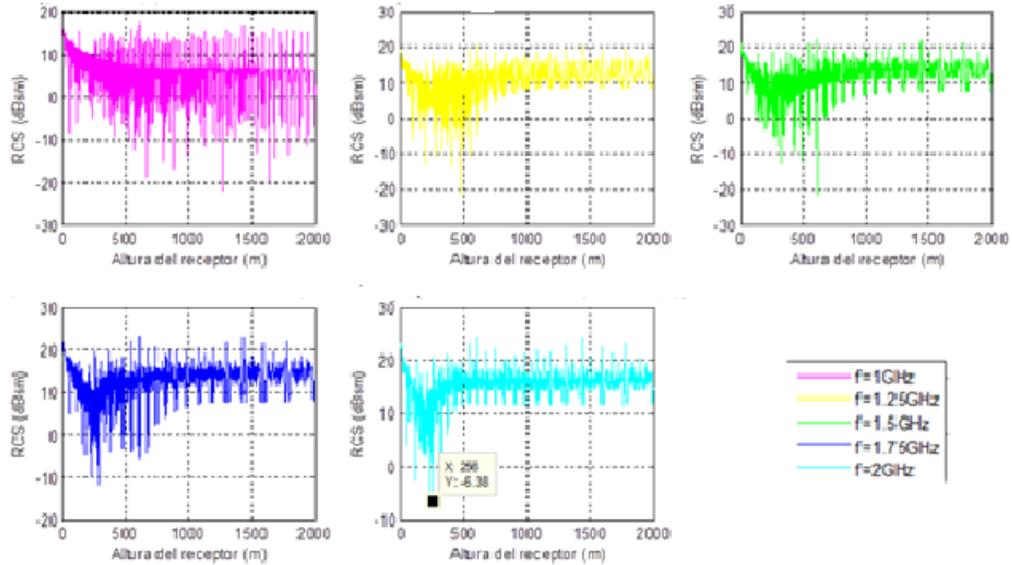
RCS del cilindro vs. Ubicación del receptor variando frecuencia



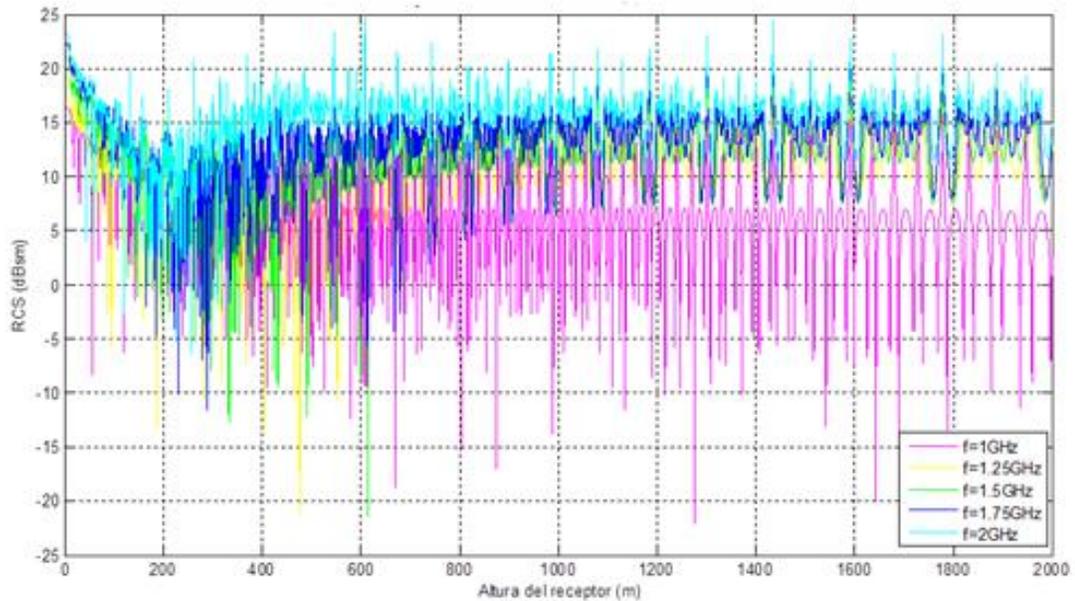
RCS del cilindro vs. Ubicación del receptor variando R_u



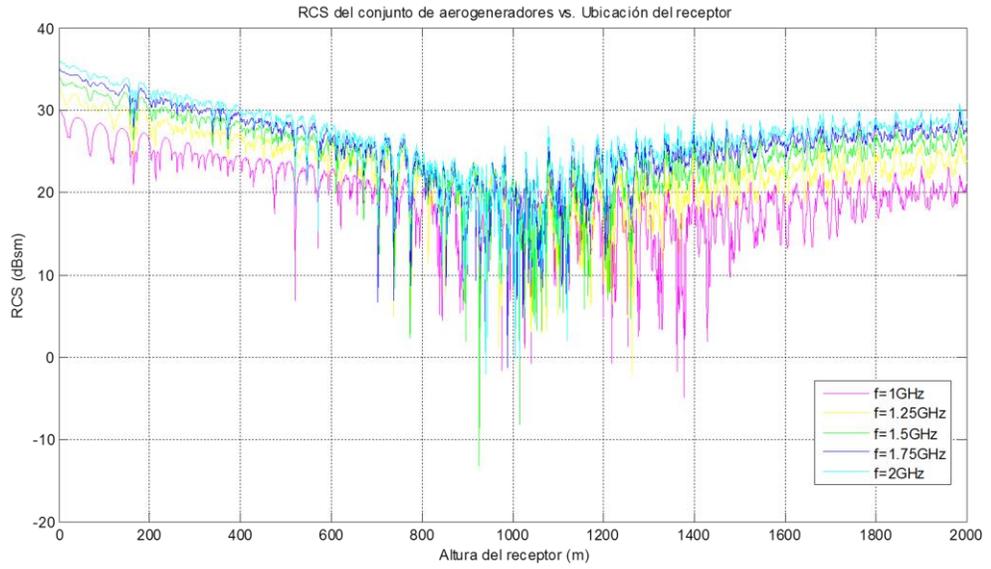
Gráfica individual RCS de 1 aerogenerador vs. Ubicación del receptor variando la frecuencia



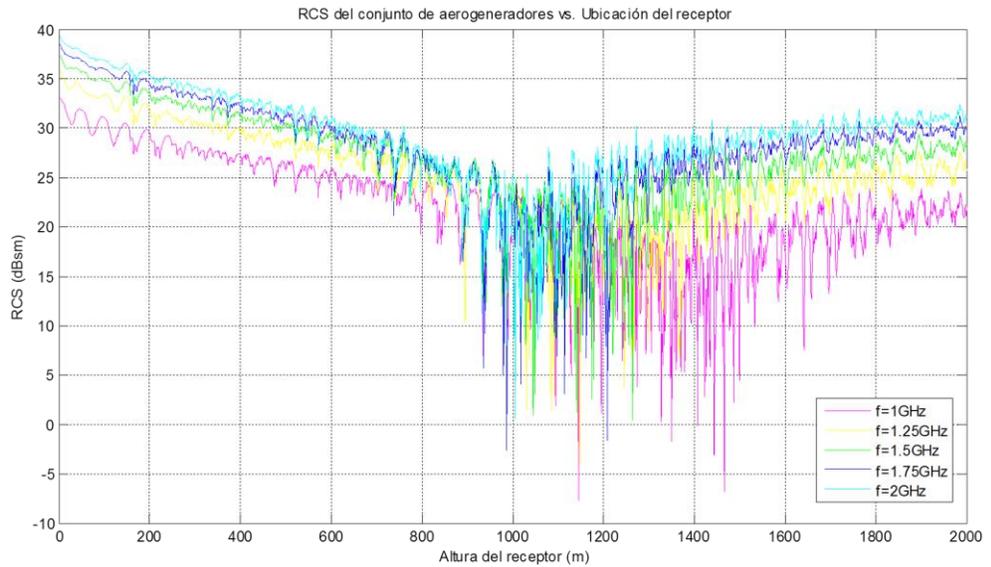
RCS de 1 aerogenerador vs. Ubicación del receptor variando la frecuencia



RCS del conjunto de 27 aerogeneradores vs. Ubicación del receptor variando la frecuencia



RCS del conjunto de 51 aerogeneradores vs. Ubicación del receptor variando la frecuencia



ANEXO G. Paper

CÁLCULO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE RADAR (RCS) DE UNA PLACA PLANA Y DE UN CILINDRO PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE AEROGENERADORES EN SISTEMAS DE NAVEGACIÓN AÉREA

Sara Isabel Pérez Restrepo¹¹
Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín – Colombia

Las señales no deseadas en un radar de operaciones de navegación aérea son una carga de trabajo extra para los controladores aéreos (AIT). En este estudio se analiza la Sección Transversal de Radar (RCS) de objetos simples por medio de un algoritmo computacional como parámetro inicial para identificar aquellos obstáculos que pueden generar blancos falsos por reflexión de las respuestas recibidas en el radar, como lo son por ejemplo, las interferencias emitidas por aerogeneradores cercanos a zonas de operación aérea.

Palabras Clave: Sección Transversal de Radar (RCS), RCS Biestática, Cilindro, Placa plana circular, Aerogenerador, señal no deseada.

Nomenclatura

m^2 = metros cuadrados

σ = sección transversal de radar

A = Área del círculo

β = Ángulo biestático

J_1 = Función de Bessel de orden uno

k= Número de onda

¹¹ Estudiante Ingeniería Aeronáutica, saraizaperez@alfa.upb.edu.co

a = radio del disco o cilindro según el caso estudiado

d = diámetro del disco

λ = Longitud de onda

x_e, y_e, z_e = coordenadas del vector posición del TX

x_o, y_o, z_o = coordenadas de vector posición del RX

L : longitud del cilindro

a_x, a_y, a_z : las componentes x, y, z de la polarización de la onda incidente

θ_i, ϕ_i : Dirección de propagación de la onda incidente

θ_s, ϕ_s : Dirección de propagación de la onda dispersada

I. Introducción

PARA los AIT es muy importante los resultados obtenidos por medio de la medición de la RCS porque permite discrepar entre una aeronave y un obstáculo. Para este último elemento, el problema de los obstáculos estáticos se encuentra resuelto mediante la eliminación de los mismos en las imágenes de radar, sin embargo, los obstáculos móviles aún se presentan como un inconveniente, de aquí que sea importante estudiar la influencia de los aerogeneradores sobre las señales de las radio ayudas, debido a que en los últimos años se ha incrementado la implementación de estos en zonas cercanas a los aeropuertos que poseen potencial eólico (condiciones de viento favorable para la explotación de energía eólica).

El problema radica en que aún no es posible garantizar la seguridad en las operaciones aéreas en cuyos aeropuertos se encuentra una operación cercana de aerogeneradores, por cual, en el presente estudio se ha desarrollado una herramienta básica para realizar la predicción de la RCS biestática de un grupo de aerogeneradores basados en formas básicas como lo son un cilindro y una placa plana circular que en conjunto buscan simular un aerogenerador y un grupo de estos (parque eólico) con el objetivo de predeterminar cuales serían las mejores disposiciones del transmisor (TX) y el receptor (RX) que componen dicho sistema. El radar biestático consiste en un radar cuya antena transmisora y receptora son distintas y se

encuentran a una distancia relativamente considerable entre sí, distinto a su contraparte, el radar monoestático, cuyo transmisor y receptor se encuentran en la misma antena.

El radar biestático, de cuyo concepto nace el término de RCS biestática, tiene la característica de tener mayor capacidad de detección de blancos que el radar monoestático. Además, debido a que sus elementos, TX y RX son diferentes, permiten que el RX pueda disponer de su posición según convenga recibir la señal, esto es, permite posicionar el radar para que opere de tal forma que refleje la menor cantidad de señales no deseadas en la interfaz que opera el AIT.

II. Sección Transversal de Radar

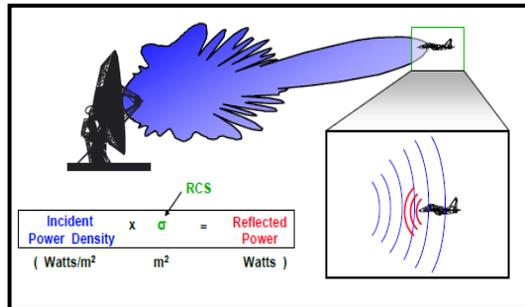
Apoyados en la figura 1, la RCS es una relación entre la densidad de potencia dispersada (*incident power density*) respecto a la densidad de potencia incidente (*reflected power*). La reflexión o potencia dispersada depende de variables que son proporcionales a la dimensión del objeto, su orientación, forma y propiedades del material del que está compuesto. Todos estos parámetros se pueden expresar por medio de un sólo parámetro denominado Sección Transversal de Radar, *RCS*. De esta forma, conociendo que la potencia o intensidad de una onda electromagnética (EM) es proporcional al cuadrado del campo eléctrico o magnético, la RCS puede ser expresada matemáticamente así (Knott, Tuley, & Shaeffer, 2004):

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_0|^2} \quad (1)$$

Donde E_0 es la fuerza del campo eléctrico de la onda incidente que incide sobre el blanco y E_s es la fuerza del campo eléctrico de la onda dispersada al radar. La expresión asume que un blanco extrae energía de una onda incidente y luego la irradia uniformemente en todas las direcciones. Aunque la gran mayoría de los blancos no dispersan la energía uniformemente en todas las direcciones, la definición asume esto. Esta suposición permite calcular la densidad de potencia dispersada sobre una superficie, donde R es típicamente tomado como el rango que existe desde el radar al blanco.

Basados en la figura 2, el ángulo que se genera entre el haz de iluminación (emisión del TX al blanco) y el haz emitido del blanco al RX se denomina ángulo biestático β , cuya consideración es importante a tener en cuenta para el desarrollo del algoritmo de predicción de la RCS biestática presentado más adelante.

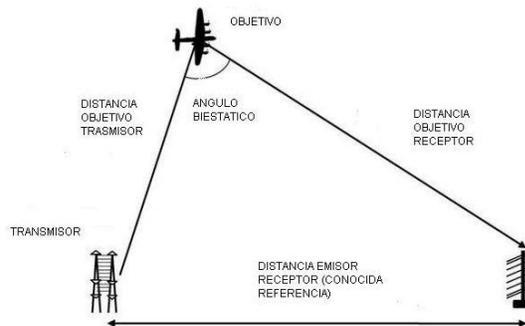
Figura 1. Representación de la medición de la RCS



Fuente: http://aess.cs.unh.edu/Radar%202010%20PDFs/Radar%202009%20A%20_1%20Introduction.pdf

[Fecha de búsqueda: 10 de abril de 2012]

Figura 2. Esquema de representación del ángulo β



Fuente: <http://1y2gm.foroactivo.com/t2281p30-la-herencia-tecnologica-alemana> [Fecha de búsqueda: 24 de

julio de 2013]

III. Ecuaciones Fundamentales para Desarrollo del Algoritmo de Predicción

Para realizar los cálculos matemáticos de los algoritmos se utilizó la herramienta Matlab¹². En el caso particular del algoritmo para determinar la RCS biestática de la placa plana¹³ este se realizó teniendo en cuenta las siguientes suposiciones:

- ❖ La placa plana es un disco de radio finito a medido en metros.
- ❖ El espesor del disco es de dimensión infinitesimal, lo cual lleva a suponer a la placa plana como un objeto de longitud cero.
- ❖ La placa tiene una superficie lisa (smooth), por lo tanto, el ángulo de incidencia Ψ para el caso monoestático es igual a la mitad del ángulo biestático β .

Cálculo teórico para el disco

A continuación se presenta la ecuación para determinar la RCS biestática de un disco circular ubicado en el origen del espacio cartesiano (Pogemiller, Chu, & Gebre-Egziabher):

$$\sigma_{disc} = 16 * \pi * \left| \frac{A * \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) * J_1\left(k * d * \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right)}{\lambda * k * d * \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} \right|^2 \quad (2)$$

Debido a la necesidad de conocer la ubicación del transmisor y el receptor dentro del sistema a evaluar, se estableció la siguiente ecuación para el ángulo biestático β :

¹² MATLAB[®] es un software de alto nivel con un entorno interactivo para el cálculo numérico, visualización y programación.

¹³ La placa plana circular será llamada como disco tanto en los cálculos matemáticos como en el algoritmo desarrollado en Matlab

$$\frac{\beta}{2} = \cos^{-1} \left(\frac{\left[\langle x_e, y_e, z_e \rangle - \frac{\langle x_o, y_o, 0 \rangle}{1 + \frac{z_o}{z_e}} \right] \cdot \langle 0, 0, 1 \rangle}{\sqrt{\left(x_e - \frac{x_o}{1 + \frac{z_o}{z_e}} \right)^2 + \left(y_e - \frac{y_o}{1 + \frac{z_o}{z_e}} \right)^2 + (z_e - 0)^2}} \right) \quad (3)$$

De esta manera, se reemplaza la ecuación (3) en la (2) para determinar la RCS de una placa plana circular cuando la reflexión de la onda se da sobre cualquier punto de su superficie, en función de las distancias del receptor y transmisor hasta un punto fijo en el espacio (origen).

En el caso particular del algoritmo para determinar la RCS biestática del cilindro este se realizó teniendo en cuenta las siguientes suposiciones:

- ❖ El cilindro para el cual se determina la RCS biestática es un cilindro circular.
- ❖ El cilindro tiene longitud finita L medido en metros.
- ❖ El cilindro tiene radio finito a medido en metros.
- ❖ El cilindro tiene una superficie lisa (smooth).

Cálculo teórico para el cilindro

A continuación se presenta la ecuación para determinar la RCS biestática de un cilindro ubicado en el origen del espacio cartesiano (Pogemiller, Chu, & Gebre-Egziabher):

$$\sigma_{cylinder} = (\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s) = \frac{a^4 * \lambda * |e^{i*k*D*L} - 1|^2}{\pi * D^2 [(A^2 + B^2) * a^2]^{3/2}} * (G_1^2 + G_2^2 + G_3^2) \quad (4)$$

Donde,

$$G_1 = A * (a_y * \sin \theta_s * \sin \varphi_s + a_z * \cos \theta_s) - B * (a_x * \sin \theta_s * \sin \varphi_s) \quad (5)$$

$$G_2 = a_z * \sin \theta_s * (A * \cos \varphi_s + B * \sin \varphi_s) \quad (6)$$

$$G_3 = B * (a_x * \sin \theta_s * \cos \varphi_s + a_z * \cos \theta_s) - A * (a_y * \sin \theta_s * \sin \varphi_s) \quad (7)$$

$$A = \sin \theta_i * \cos \varphi_i + \sin \theta_s \cos \varphi_s \quad (8)$$

$$B = \sin \theta_i * \sin \varphi_i + \sin \theta_s \sin \varphi_s \quad (9)$$

$$D = \cos \theta_i + \cos \theta_s \quad (10)$$

Al igual que en el caso del disco, mediante algoritmos geométricos es posible obtener los ángulos θ_s , φ_s , θ_i , φ_i en términos de la posición del transmisor y receptor, como se indica a continuación:

$$R_o = \sqrt{x_o^2 + y_o^2 + z_o^2} \quad (11)$$

$$\theta_s = \cos^{-1} \left(\frac{z_o}{R_o} \right) \quad (12)$$

$$\varphi_s = \tan^{-1} \left(\frac{y_o}{x_o} \right) \quad (13)$$

$$R_{to} = \sqrt{x_e^2 + y_e^2 + z_e^2} \quad (14)$$

$$\theta_i = \cos^{-1} \left(\frac{z_e}{R_{to}} \right) \quad (15)$$

$$\varphi_i = \tan^{-1} \left(\frac{y_e}{x_e} \right) \quad (16)$$

De esta manera los ángulos θ_s , ϕ_s , θ_i , ϕ_i podrán reemplazarse en las ecuaciones (11) a la (16) para cambiar el sistema a coordenadas cartesianas.

RCS de la aproximación al aerogenerador

Según el libro *Radar System analysis and design using MATLAB*, en el capítulo referido a Radar Cross Section, la RCS de un blanco complejo es calculada por la combinación coherente de las secciones transversales de las formas simples que construyen el blanco complejo.

En general, un blanco complejo puede modelarse mediante un grupo de centros de dispersión individuales dispersos por el objeto (elementos finitos o volúmenes finitos), estos centros de dispersión se modelan como puntos isotrópicos y según *Bassem R. Mahafza* este modelo es llamado *N-point model*. El otro modelo para determinar la RCS del blanco complejo se llamado *N-shape model* y es exactamente el utilizado en este paper para determinar la RCS del modelo complejo aproximado a un aerogenerador. En este modelo se determinan igualmente los puntos de dispersión, los cuales están ubicados en puntos de referencia fijos en el espacio (Mahafza, 2013).

El cálculo de la RCS para la aproximación al aerogenerador tiene las siguientes suposiciones:

- La torre del aerogenerador es un cilindro de radio constante en toda su longitud.
- Las palas se simulan como un disco.
- El aerogenerador tomado de referencia para establecer las dimensiones geométricas es el SWT-2.3-93 marca Siemens, ya que es el aerogenerador utilizado en un número significativo de parques eólicos españoles.

Debido a que los cálculos son una combinación de la placa plana y el cilindro, las siguientes figuras esquematizan el aerogenerador resultante:

Figura 3. Aproximación de aerogenerador a formas simples

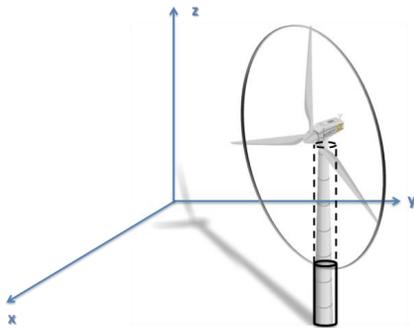
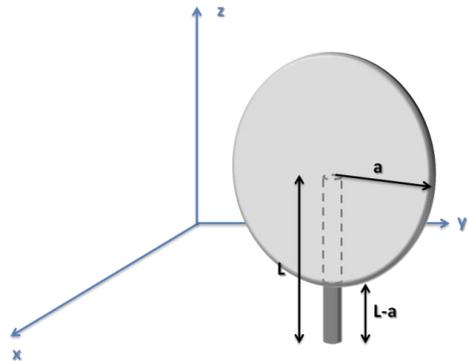


Figura 4. Dimensionamiento de formas simples



IV. Resultados Obtenidos

Los análisis realizados para la placa plana y el cilindro se hicieron variando la frecuencia y la distancia horizontal (R_u) entre el eje z y la posición del RX. Los resultados obtenidos para la variación de la frecuencia fueron:

Figura 5. RCS del disco vs. Posición del receptor, con variación en la frecuencia

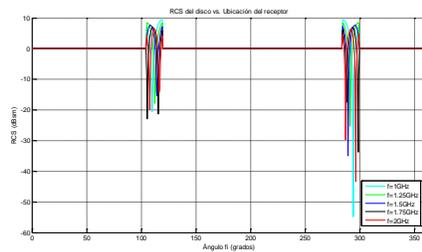


Tabla 1. Valores mínimos de RCS en el rango de frecuencias establecido (disco)

Frecuencia [GHz]	Ángulo ϕ_i [grados]	RCS mínima [dBsm]
1	293,9	-58,87
1,25	291,1	-25,37
1,5	289,3	-34,98
1,75	298,5	-33,81
2	296,2	-43,39

La figura anterior muestra todas las gráficas de la RCS para diferentes frecuencias en la banda L. De allí se obtienen puntos específicos de ubicación del receptor donde la RCS es mínima. Estos puntos dependientes de la frecuencia se encuentran discriminados en la siguiente tabla 1. Donde:

$a = 46.5 \text{ m}$
 $Re = [3036.14 \ 7571.73 \ 74]$
 $Ru = 100$
 $Ro = [Ru * \cos(\phi_i) \ Ru * \sin(\phi_i) \ 50]$ con $\phi_i = 0 : 2\pi$
 $f = 1 \text{ a } 2 \text{ GHz}$

Figura 6. RCS del cilindro vs. Ubicación del receptor, con variación en la frecuencia

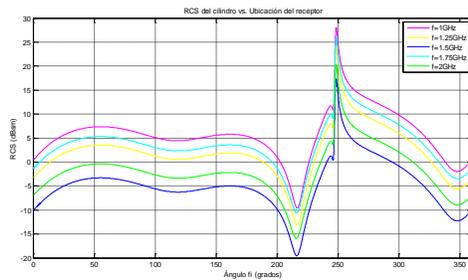


Tabla 2. RCS del cilindro en la banda de frecuencia L

Frecuencia [GHz]	Ángulo ϕ_i [grados]	RCS mínima [dBsm]
1	216,6	-9,589
1,25	216,5	-13,09
1,5	216,4	-19,55
1,75	216,2	-10,58
2	215,9	-15,93

Los puntos donde la RCS es mínima en la evaluación del cilindro para estas cinco frecuencias se observan en la tabla 2. Donde,

$a = 4.5 \text{ m}$
 $L = 80 \text{ m}$
 $Re = [3036.14 \ 7571.73 \ 74]$
 $Ru = 50 \text{ m}$
 $Ro = [Ru * \cos(\phi_i) \ Ru * \sin(\phi_i) \ 50]$ con $\phi_i = 0 : 2\pi$
 $f = 1 \text{ a } 2 \text{ GHz}$

Los resultados obtenidos para la variación de la distancia Ru fueron:

Figura 7. RCS del disco vs. Posición del receptor, con variación en Ru

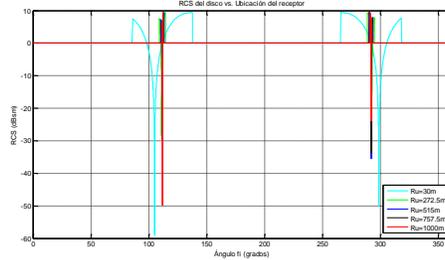


Tabla 3. Valores mínimos de RCS en el rango de Ru establecido

Ru [m]	Ángulo fi [grados]	RCS mínima [dBsm]
30	105	-59,01
272,5	292,6	-32,8
515	292,3	-35,42
757,5	292,2	-33,7
1000	111,7	-49,8

La figura anterior muestra todas las gráficas de la RCS del disco para diferentes radios de ubicación del receptor respecto a la posición del disco. De allí se obtienen puntos específicos de ubicación del receptor donde la RCS es mínima. Estos puntos dependientes del radio Ru se encuentran discriminados en la tabla 3. Donde,

$$a = 46.5 \text{ m}$$

$$Re = [3036.14 \quad 7571.73 \quad 74]$$

$$f = 1 \text{ GHz}$$

$$Ro = [Ru \cdot \cos(\phi_i) \quad Ru \cdot \sin(\phi_i) \quad 50] \quad \text{con } \phi_i = 0 : 2\pi$$

$$Ru = 30 \text{ a } 1000 \text{ m}$$

Figura 8. RCS del cilindro vs. Ubicación del receptor, variando Ru

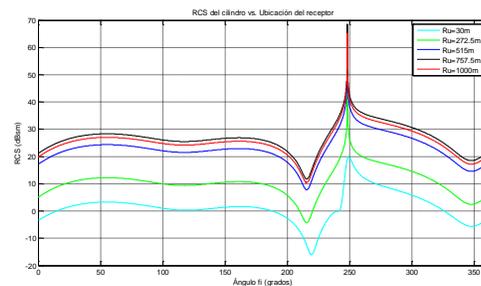


Tabla 4. Valores de RCS mínimos para el cilindro para las distancias Ru específicas

Ru [m]	Ángulo fi [grados]	RCS mínima [dBsm]
30	219,4	-16,09
272,5	215,6	-4,288
515	215,6	7,796
757,5	215,6	11,76
1000	215,6	10,44

Mediante el análisis de la figura 8. se puede obtener como conclusión que la RCS mínima en el caso del cilindro se da cuando el receptor está ubicado a 30 m del origen relativo, es decir, del punto de posición del cilindro. Para saber cuál es este punto se presenta la tabla 4. Donde,

$$a = 4.5\text{m}$$

$$L = 80\text{m}$$

$$R_e = [3036.14 \quad 7571.73 \quad 74]$$

$$f = 1 \text{ GHz}$$

$$R_o = [R_u \cdot \cos(\phi_i) \quad R_u \cdot \sin(\phi_i) \quad 50] \quad \text{con } \phi_i = 0 : 2\pi$$

$$R_u = 30 \text{ a } 1000 \text{ m}$$

Al unir ambos objetos y crear un nuevo algoritmo en Matlab, se obtienen los resultados para el aerogenerador. Para el análisis del aerogenerador variando la frecuencia de operación, se tuvieron en cuenta los siguientes datos y variables:

$$a_{\text{cilindro}} = 4.5\text{m}$$

$$L_{\text{cilindro}} = 80\text{m}$$

$$a_{\text{disco}} = 46.5\text{m}$$

$$x = 0 \text{ [m] (ubicación aerogenerador)}$$

$$y = 0 \text{ [m] (ubicación aerogenerador)}$$

$$R_e = [3036.14 \quad 7571.73 \quad 74]$$

$$R_o = [R_o; 0 \ 0 \ z] \quad \text{con } z = 0 : 1 : 2000 \text{ [m]}$$

$$f = 1 \text{ a } 2 \text{ GHz}$$

La gráfica obtenida para estos datos y variables es:

Figura 9. RCS de un aerogenerador vs. Altura del receptor, variando la frecuencia

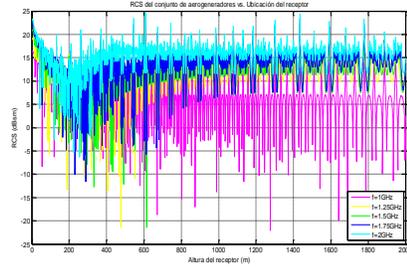


Tabla 5. Valores de RCS mínimos para un aerogenerador en función del cambio en la frecuencia

Frecuencia [GHz]	Altura Receptor [m]	RCS mínima [dBsm]
1	1276	-22,09
1,25	476	-21,35
1,5	614	-21,43
1,75	290	-11,6
2	256	-6,38

En la figura anterior observarse que todas las gráficas tienen valores que no distan mucho unos de otros, sin embargo, los puntos de mínima RCS sólo son similares en las gráficas para 1, 1.25 y 1.5 GHz, pudiendo discriminarse exactamente en la tabla 5.

La RCS de un aerogenerador vs. Altura del receptor, con el aerogenerador a una distancia simétrica entre TX-objeto-RX se realizó teniendo en cuenta los siguientes datos:

$a_{cilindro} = 4.5m$

$L_{cilindro} = 80m$

$a_{disco} = 46.5m$

$x = 3036.14 [m]$ (ubicación aerogenerador)

$y = 3785.865 [m]$ (ubicación aerogenerador)

$Re = [3036.14 \ 7571.73 \ 74]$

$Ro = [Ro; 3036.14 \ 0 \ z]$ con $z = -2000 : 1 : 2000$

$f = 1$ a 2 GHz

Figura 10. RCS del aerogenerador vs. Altura del receptor, con distancia simétrica

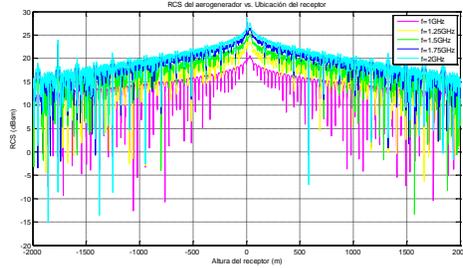


Tabla 6. Valores de RCS mínima para una aerogenerador ubicado simétricamente

Frecuencia [GHz]	Altura Receptor [m]	RCS mínima [dBsm]
1	-1059	-12,63
1,25	1663	-6,38
1,5	1574	-13,36
1,75	-1761	-3,85
2	-1855	-15,08

Los valores mínimos se muestran en la tabla 6. La evaluación de la RCS del conjunto de 27 aerogeneradores variando la frecuencia se desarrolló teniendo en cuenta lo datos listados a continuación:

- a_cilindro= 4.5m
- L_cilindro= 80m
- a_disco= 46.5m
- x=5000:250:5500 [m] (ubicación aerogeneradores)
- y=0:250:2000 [m] (ubicación aerogeneradores)
- Re= [3036.14 7571.73 74]
- Ro= [Ro; 0 0 z] con z=0 :1: 2000 [m]

Figura 11. RCS de los 27 aerogeneradores vs. Ubicación del receptor

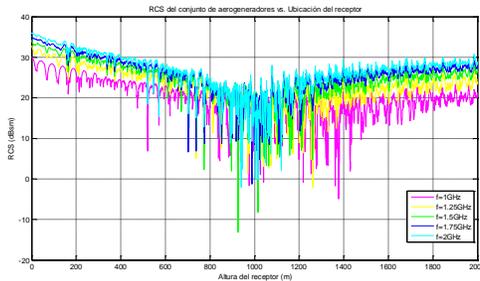


Tabla 7. Altura del receptor donde la RCS es mínima variando la frecuencia

Frecuencia [GHz]	Altura Receptor [m]	RCS mínima [dBsm]
1	1377	-4,956
1,25	1262	-2,087
1,5	926	-13,23
1,75	988	-1,277
2	940	-2,024

Esta gráfica deja ver exactamente cuál es el punto donde la RCS es mínima y cómo en los intervalos [0, 600] y [1400, 200] en x, la gráfica de la RCS a una frecuencia de 1.5 GHz se ubica en el medio de las demás gráficas, es decir que posiblemente sea la frecuencia adecuada para la operación del radar, pues aunque todos los puntos de esta gráfica no son mínimos, es la que presenta valores promedio de RCS y una oscilación menor en comparación con las demás gráficas.

La presentación clara de estos resultados se presenta en la tabla 7. La evaluación final de la RCS se desarrolló para un conjunto de 51 aerogeneradores vs. Altura de receptor, donde los datos fueron:

$$a_{\text{cilindro}} = 4.5\text{m}$$

$$L_{\text{cilindro}} = 80\text{m}$$

$$a_{\text{disco}} = 46.5\text{m}$$

$$x = 5000:250:5500 \text{ [m]} \text{ (ubicación aerogeneradores)}$$

$$y = -2000:250:2000 \text{ [m]} \text{ (ubicación aerogeneradores)}$$

$$R_e = [3036.14 \ 7571.73 \ 74]$$

$$R_o = [R_o; 0 \ 0 \ z] \text{ con } z = 0 : 1 : 2000 \text{ [m]}$$

$$f = 1 \text{ a } 2 \text{ GHz}$$

Los resultados para esta ubicación y número de aerogeneradores se evidencian en la siguiente gráfica y los valores de mínima RCS se presentan en la tabla 8.

Figura 12. RCS del conjunto de 51 aerogeneradores vs. Ubicación del receptor

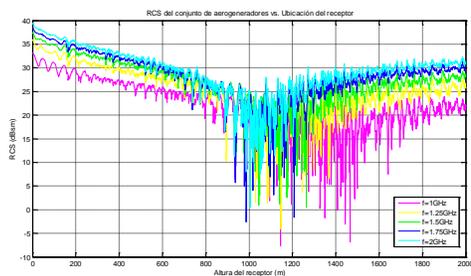


Tabla 8. Valores de mínima RCS para las diferentes frecuencia, en el caso de 51 aerogeneradores

Frecuencia [GHz]	Altura Receptor [m]	RCS mínima [dBsm]
1	1145	-7,657
1,25	1147	-4,11
1,5	1265	0,436
1,75	987	-2,599
2	1006	0,5709

V. Conclusiones

El algoritmo desarrollado tiene como alcance realizar evaluaciones de la sección transversal de radar biestática (RCS biestática) para una placa plana circular y un cilindro, ambos de cualquier dimensión y ubicación fija en el espacio. Además evalúa el impacto en la medición de la RCS biestática de uno o varios aerogeneradores por medio de la unión básica de objetos (cilindro y placa circular), los cuales pueden ser ubicados con relación a un punto de referencia para simular un parque eólico y determinar el impacto de dicha RCS sobre la señal receptora en función de la posición de estos y la ubicación de un receptor de la señal radar.

Teniendo en cuenta que obtener una menor RCS significa tener menos señales de radar no deseadas, se evaluaron dos variables durante el desarrollo del trabajo de grado, frecuencia teniendo en cuenta la operación de banda de las radio ayudas aeroportuarias y posición de recepción de la señal.

Al variar la frecuencia pudo determinarse que la menor RCS de una placa plana circular se obtiene para 1 GHz donde la RCS mínima es de -58,87 dBsm, es decir, $1,3e-6 \text{ m}^2$ y para un cilindro sucede cuando la frecuencia es de 1,5GHz donde la RCS mínima es de -19,55 dBsm, es decir, $1,1e-2 \text{ m}^2$. Ambos resultados resultan ser valores pequeños comparados con la RCS típica de una aeronave comercial, la cual se encuentra alrededor de 1 m^2 , por lo tanto, ninguno de los dos objetos se verá reflejado como un objeto no deseado en el radar. Específicamente para el caso del disco, el receptor debe estar idealmente ubicado en el punto $R_0=[20,3 -45,7 \ 50]$, sin embargo, este puede estar ubicado en los dos intervalos donde hay valores mínimos de RCS, es decir, en una ubicación donde las ondas emitidas por las caras del disco no incidan sobre el receptor o donde el objeto no recibe las ondas transmitidas. Para el caso del cilindro, el receptor debe ubicarse en la posición $R_0=[-40,2 \ -29,7 \ 50]$ para obtener el valor mínimo de RCS teniendo en cuenta la posición del transmisor establecida en el análisis.

La segunda variable, posición del receptor, permitió determinar que la RCS mínima de una placa plana circular es -59,01 dBsm a una distancia de 30 m, sin embargo, como esta distancia es representada por la gráfica con mayor rango de variación en la distancia, la RCS concluyente para este análisis fue -49,8 dBsm ($1,05e-5 \text{ m}^2$) la cual no dista mucho de la anterior; ésta para una distancia R_u de 1000 m. Para el caso del

cilindro, la RCS mínima es -16,09 dBsm, la cual equivale a $2,46 \text{ m}^2$ para una distancia R_u de 30 m. Cuando se mira la RCS para cada objeto desde un punto analítico se concluye que la RCS mínima del cilindro debe ser más alta que la del disco, esto debido a que el área que refleja las ondas sobre el receptor en el cilindro es mayor que en el receptor; al analizar cuantitativamente esta suposición se determina la veracidad de lo anteriormente mencionado. Esta conclusión teniendo en cuenta que la frecuencia de evaluación de ambos análisis fue 1GHz.

En el caso del disco para la anterior evaluación la posición del receptor debe estar en el punto $R_o = [-369,8 \ 929,13 \ 50]$, teniendo en cuenta que no es el punto donde la RCS es mínima en comparación a las demás gráficas, sino el punto donde el valor de RCS es mínimo para la distancia R_u más adecuada, ya que la distancia $R_u = 30\text{m}$ es donde está el valor mínimo pero también es donde hay un rango mayor donde la RCS es mayor a 0 dBsm (1 m^2). Para el cilindro, la posición del receptor donde el valor de RCS es mínimo está en el punto $R_o = [-23,2 \ -19 \ 50]$ ¹⁴.

Se desarrolló un algoritmo que permite calcular la RCS para un grupo de aerogeneradores, estos conformados a partir de una placa plana circular y un cilindro, algoritmos desarrollados en función de variables significativas como la distancia TX-objeto y la distancia RX-objeto. Estos aerogeneradores se pueden evaluar en sin número de disposiciones para determinar la mejor ubicación de la antena receptora en pro de obtener la menor cantidad de señales no deseadas. Las disposiciones y condiciones evaluadas, obtienen los resultados óptimos de menor RCS cuando al evaluar un sólo aerogenerador, el receptor está ubicado en el punto $R_o = [0 \ 0 \ 1276]$ donde el origen del vector posición está en el origen de las coordenadas absolutas. Allí, la RCS mínima es -22,09 dBsm, es decir, $6,2e-3 \text{ m}^2$ a una frecuencia de 1GHz. Al evaluar un grupo de aerogeneradores y aumentar el número de estos cuando se realizaba un nuevo análisis permitió determinar que cuando el número de aerogeneradores aumenta también aumenta el valor de RCS mínima, es decir, pasa de -22,09 dBsm cuando se evalúa un aerogenerador a -13,23 dBsm para 27 aerogeneradores y finalmente, a -7,657 dBsm para 51 aerogeneradores. Sin embargo, el valor más alto de los tres anteriormente mencionados

¹⁴ Las ubicaciones mencionadas tienen unidades en metros, tanto para las evaluaciones donde la frecuencia es la variable como para las demás donde la distancia R_u es la que varía.

es un valor bajo de RCS, $-7,657$ dBsm equivale a $0,17$ m² en comparación a la RCS aproximada de una aeronave comercial (RCS=1 m²).

Finalmente puede decirse que es posible discriminar entre un objeto, ya sea una placa plana circular, un cilindro, un aerogenerador o un grupo determinado de estos y, una aeronave en la imagen de un radar, ya que la RCS para estos objetos es significativamente diferente de la RCS de una aeronave comercial, sin embargo, esto sólo es posible para las ubicaciones específicas determinadas en el desarrollo del trabajo.

VI. Referencias

- AENA. (2012). *AIP ESPAÑA AD2 - GCLP1*. Datos del Aeródromo, Las Palmas-Gran Canaria.
- Barton, D. K., & Leonov, S. A. (1998). *Radar Technology Eyclopedia*. Artech House, Inc.
- Blake, L. V. (1972). *Calculation of the Radar Cross Section of a Perfectly Sphere*. Whashington, D.C.
- Casals, J. M. (1991). *Sección recta de blancos radar complejos en tiempo real*. Barcelona.
- Chatzigeorgiadis, F. (2004). *Development of code for a physical optics radar cross section prediction and analysis application*. Monterrey, California.
- Díaz, M. A. (2005). *Modelado de un radar doppler de pulsos (PDR)*. Tijuana.
- Díaz, V., & Gómez, J. M. (2011). Análisis de Métodos de Evaluación de la Sección Transversal de Radar y de los Parámetros que inciden en Ella para Buques de Superficie. 11.
- Knott, E. F., Tuley, M. T., & Shaeffer, J. F. (2004). *Radar Cross Section* (Segunda edición ed.). SciTech Publishing Inc.
- Mahafza, B. R. (2013). *Radar system analysis and design using MATLAB*. Boca Ratón: CRC Press.
- Martí, E. G., & Galera, J. L. (2009). *Sistemas de Radar para control de tráfico, detección e inhibición de la señal*.
- Otermin. Etayo, I. (2007). *ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS PARQUES EÓLICOS EN LA PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS, Y EN LA PRESTACIÓN DE SERVICIO DE SISTEMAS TERRENALES DE RADIO-NAVEGACIÓN AÉREA CERCANOS*. Pamplona.

Pogemiller, J. A., Chu, C.-C., & Gebre-Egziabher, D. (n.d.). A GPS Bistatic Radar for Small Satellite Applications. *23rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites* .

Rodríguez. Olatz, et al. (2010). *CARACTERIZACIÓN DE LA SECCIÓN RADAR DE AEROGENERADORES. PAÍS VASCO.*

Ruck, G. T. (1970). *Radar Cross Section Handbook*. New York: Plenum Press.

Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2008). *Física para Ciencias e Ingeniería con Física Moderna*. México: CENGAGE Learning.

Skolnik, M. I. (2008). *Radar Handbook*. United States of America: Mc Graw Hill.