



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Evaluación del impacto de los aerogeneradores sobre el radar de vigilancia aérea

TRABAJO FINAL DEL
Grado en Ingeniería Aeroespacial

REALIZADO POR
Juan Alberto Martínez Lores

TUTORIZADO POR
Juan Antonio Vila Carbó

FECHA: Valencia, septiembre, 2019

Agradecimientos

Deseo expresar mis agradecimientos a todos los que han hecho posible y me han ayudado en la elaboración de este trabajo. En primer lugar, a mis padres, que me han dado la oportunidad de estar aquí hoy, especialmente a mi madre, que siempre se ha preocupado de que nunca me rindiera y de darme todo el apoyo posible. En segundo lugar, a la Universidad Politécnica de Valencia, que se ha encargado de proporcionarme los conocimientos necesarios y a mi tutor, Joan Vila, por su apoyo durante la elaboración de este TFG.

Resumen

Desde finales del siglo XX, el interés por las energías renovables no ha hecho más que aumentar, ya sea por interés económico o ecológico, debido a que son la energía del futuro. La crisis mundial de 2008 freno en seco este desarrollo y quedo estancado durante muchos años, pero recientemente hemos podido observar un repunte la inversión de energías renovables propiciado principalmente por el cambio climático. La industria aeronáutica ha demostrado también un gran interés por este tipo de energía, donde ya podemos observar fábricas alimentadas completamente con fuentes renovables o aeropuertos completamente independientes de la red eléctrica convencional.

En el presente TFG, que tiene como título “Evaluación del impacto de los aerogeneradores sobre el radar de vigilancia aérea”, hemos estudiado como afectan los parques eólicos al *PSR, Primary Surveillance Radar*, de un aeropuerto. Para ello hemos comenzado con una pequeña introducción de cuál es el problema planteado y cuáles son nuestros objetivos. A continuación, se da una descripción de los aerogeneradores y de las características del radar. Seguidamente se explica los problemas que pueden causar los aerogeneradores en el radar, así como el tipo de estudio que hemos realizado en función de cuales de estos problemas hemos tratado. Finalmente realizaremos una simulación en *Matlab* en la cual obtendremos las conclusiones y analizaremos que posibles soluciones se podrían aplicar.

Contenido

Índice de figuras.....	7
Índice de tablas.....	9
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Motivaciones	11
1.2 Objetivos	12
2. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA A SIMULAR	13
2.1 Aerogeneradores	13
2.2 Especificaciones del radar	14
2.3 Sección Recta Radar	16
2.4 Efecto Doppler	18
2.5 Tipo de estudio	19
3. EFECTOS DE LOS AEROGENERADORES SOBRE EL RADAR PRIMARIO	21
3.1 Efectos de sombra.....	21
3.2 Falsos blancos y blancos intermitentes.....	21
3.3 Enmascaramiento de blancos por aumento de nivel de <i>clutter</i>	22
3.4 Pérdida de capacidad de detección por aumento del umbral CFAR.....	23
3.5 . Pérdida de capacidad de detección por aumento del umbral AMTI	23
3.6 Degradación de las capacidades de seguimiento (<i>tracking</i>)	23
3.7 Saturación del receptor.....	24
3.8 Reflexiones indirectas	24
4. ENTORNO DE SIMULACION	27
4.1 Sombra producida por el aerogenerador.....	27
4.2 Simulación del radar y sus filtros de señal	30
4.2.1 Modelos Swerling.....	30
4.2.2 Filtro MTI	31
4.2.3 Procesamiento CFAR	32
5. RESULTADOS DE LA SIMULACION	34
5.1 Sombra del aerogenerador.....	34
5.2 Filtro MTI y algoritmo CFAR.....	35
6. CONCLUSIONES Y POSIBLES MITIGACIONES	45
6.1 Radares 3D.....	45
6.2 Radares complementarios (<i>in-fill radars</i>).....	46
6.3 Análisis de firmas y procesamiento radar	46
6.4 Restricciones en la ubicación de los aerogeneradores	47
6.5 Soluciones constructivas para suprimir la firma radar de los aerogeneradores	47
6.6 Mitigaciones que implican degradaciones operativas.....	48
A) Presupuestos.....	49

1) Gastos de personal	49
2) Gastos de material.....	49
3) Coste total de la ejecución del proyecto.....	50
Bibliografía	51

Índice de figuras

Ilustración 1-1 Comparación de edificios con un aerogenerador.	11
Ilustración 2-1 Funcionamiento básico de un radar primario.	13
Ilustración 2-2 Diagrama de radiación de la antena.....	16
Ilustración 2-3 (a) Geometría de un aerogenerador de 2 MW. (b) Segmentación del aerogenerador. (c) Punto con el RCS situado en el centro de cada segmento.....	17
Ilustración 2-4 RCS de los objetos más comunes.	18
Ilustración 2-5 Dependencia de la frecuencia Doppler con el tiempo para tres álabes. ...	19
Ilustración 3-1 Vista en planta de la sombra del aerogenerador.	21
Ilustración 3-2 Vista lateral de la sombra del aerogenerador.	21
Ilustración 3-3 Caso de reflexión 1	25
Ilustración 3-4 Caso de reflexión 2	25
Ilustración 3-5 Caso de reflexión 3	26
Ilustración 3-6 Caso de reflexión 4	26
Ilustración 4-1 Esquema para calcular la altura de la sombra	27
Ilustración 4-2 Diagrama de sección recta radar de una sombra.....	29
Ilustración 4-3 Diferencia de trayectoria para calcular el ancho de la sombra	29
Ilustración 4-4 Respuesta en frecuencia del cancelador de tres pulsos.....	31
Ilustración 4-5 Señal a la entrada (a) y señal a la salida (b).	32
Ilustración 4-6 Esquema del procesamiento CA-CFAR	32
Ilustración 4-7 Esquema del procesamiento de la señal.....	33
Ilustración 5-1 Vista general de los límites de la sombra.....	34
Ilustración 5-2 Vista en planta de la sombra.....	35
Ilustración 5-3 Señal recibida antes y después del filtro (una interferencia y ratio $RCS_w/RCS_a = 1.1$)	36
Ilustración 5-4 Señal recibida antes y después del filtro con zoom (una interferencia y ratio $RCS_w/RCS_a = 1.1$)	37
Ilustración 5-5 . Señal recibida antes y después del filtro con zoom (dos interferencias).	38
Ilustración 5-6 Señal recibida antes y después del filtro con zoom (cuatro interferencias)	38
Ilustración 5-7 Efecto de la altura sobre la probabilidad de detección.	39
Ilustración 5-8 Efecto de la distancia sobre la probabilidad de detección.	40
Ilustración 5-9 Efecto del ratio de RCS sobre la Probabilidad de detección.	41
Ilustración 5-10 Efecto del ratio de RCS sobre la Probabilidad de detección con dos interferencias	42
Ilustración 5-11 Efecto del ratio de RCS sobre la Probabilidad de detección con cuatro intereferencias.	42

Ilustración 5-12 Efecto del ratio de RCS=1.1 sobre la Probabilidad de detección en función de las interferencias..... 43

Ilustración 5-13 Probabilidad de falso blanco en función de la distancia. 44

Ilustración 5-14 Probabilidad de falso blanco frente a probabilidad de detección. 44

Ilustración 6-1 Radar 3D 46

Índice de tablas

Tabla 1 Características físicas de los aerogeneradores	14
Tabla 2 Especificaciones del radar.....	14
Tabla 3 Velocidades y frecuencias Doppler máximas de diferentes aerogeneradores. ...	18
Tabla 4 Tipo de estudio según la zona.....	20
Tabla 5 Simbología de las ecuaciones	28
Tabla 6 Datos para el cálculo de la sombra	34
Tabla 7 Costes derivados de la mano de obra	49
Tabla 8 Gastos de materiales	50
Tabla 9 Coste total del proyecto.....	50

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivaciones

La elección del presente Trabajo Final de Grado se debe principalmente a una serie de preferencias personales del autor respecto al funcionamiento real de los sistemas de vigilancia aérea y al estado en el que se encuentran actualmente la implementación de las fuentes de energía renovables en el entorno civil, con todas las ventajas y problemas que puedan acarrear.

En los últimos años, la Unión Europea ha propuesto varias estrategias que tienen como objetivo garantizar que un porcentaje de la energía producida procedan de fuentes renovables. Actualmente una de las energías renovables con más potencial que se puede instalar en la zona circundante de edificios aeroportuarios es la energía eólica. Sin embargo, dicha fuente de energía renovable presenta tres problemas. El primero es su tamaño, estos aerogeneradores producen más energía cuanto más grandes son, pudiendo llegar hasta alturas de más de doscientos metros. El segundo es su construcción, estos aerogeneradores utilizan es su totalidad materiales metálicos que pueden provocar grandes reflexiones de las señales del radar de vigilancia aérea. El último problema son las palas de los aerogeneradores, capaces de alcanzar velocidades muy elevadas cuando funcionan a pleno rendimiento lo que provocaría que fueran localizadas por el radar de vigilancia aérea.

HALIADÉ-X 12 MW

GE Renewable Energy is developing **Haliadé-X 12 MW**, the biggest offshore wind turbine in the world, with **220-meter rotor**, **107-meter long blades**, leading capacity factor (**63%**), and **digital capabilities**, that will help our customers find success in an increasingly competitive environment.

One **Haliadé-X 12 MW** can generate **67 GWh annually**, which is **45% more** annual energy production (AEP) than most powerful machines on the market today, and twice as much as the Haliadé 150-6MW.

The **Haliadé-X 12 MW** turbine will generate enough clean power for up to **16,000** European households per turbine, and up to **1 million** European households in a 750 MW configuration windfarm.

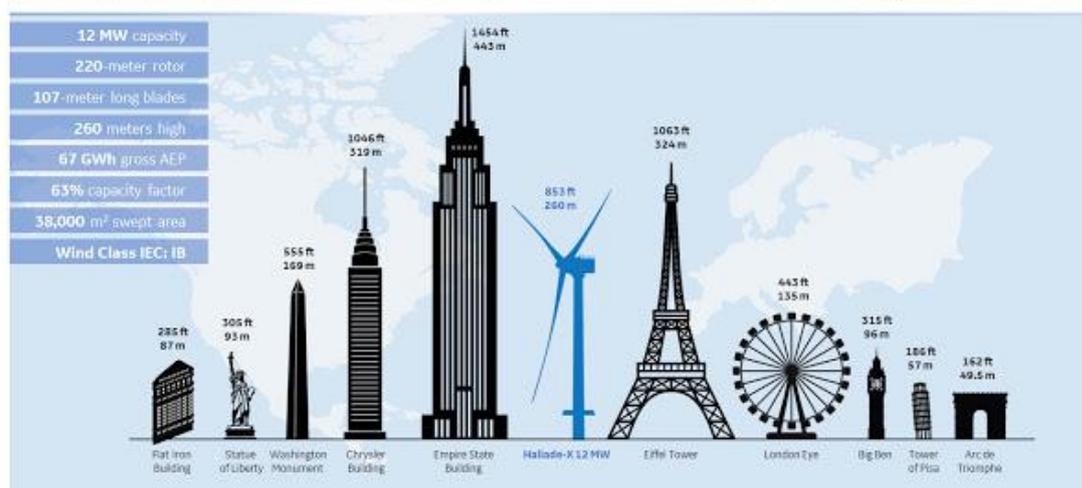


Ilustración 1-1 Comparación de edificios con un aerogenerador.

INTRODUCCIÓN

1.2 Objetivos

Con lo visto anteriormente definimos una lista de objetivos que cumplir en el presente Trabajo Final de Grado:

1. Buscar información sobre los tipos de aerogeneradores que se instalan actualmente cerca de los aeropuertos.
2. Detallar cuáles son las características del radar primario (Tipo de antena, polarización, alcance, etc....)
3. Explicar los problemas que pueden provocar los aerogeneradores
4. Detallar el funcionamiento del radar primario, así como de los filtros que este utilice y que vayamos a simular nosotros.
5. Simular el funcionamiento del radar en presencia de los aerogeneradores en varias situaciones.
6. Obtener las posibles mitigaciones o soluciones que sean necesarias.

2. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA A SIMULAR

En este apartado procederemos a explicar las características de los aerogeneradores, así como del radar. Además, explicamos un par de conceptos importantes que son muy influyentes para esta simulación y el tipo de estudio que vamos a realizar.

Antes de comenzar explicaremos brevemente en que se basa el funcionamiento PSR (Primary Surveillance Radar), de aquí en adelante llamado también radar primario.

El radar primario basa su funcionamiento en la ecolocalización, es decir, genera un pulso electromagnético y lo envía a través de un haz de radiación. Cuando impacta en un blanco, se refleja y vuelve al radar, el cual es captado por la antena, donde se mide cuanto tiempo ha tardado para averiguar la posición del objeto sabiendo la dirección en la que estaba apuntando el haz de radiación.

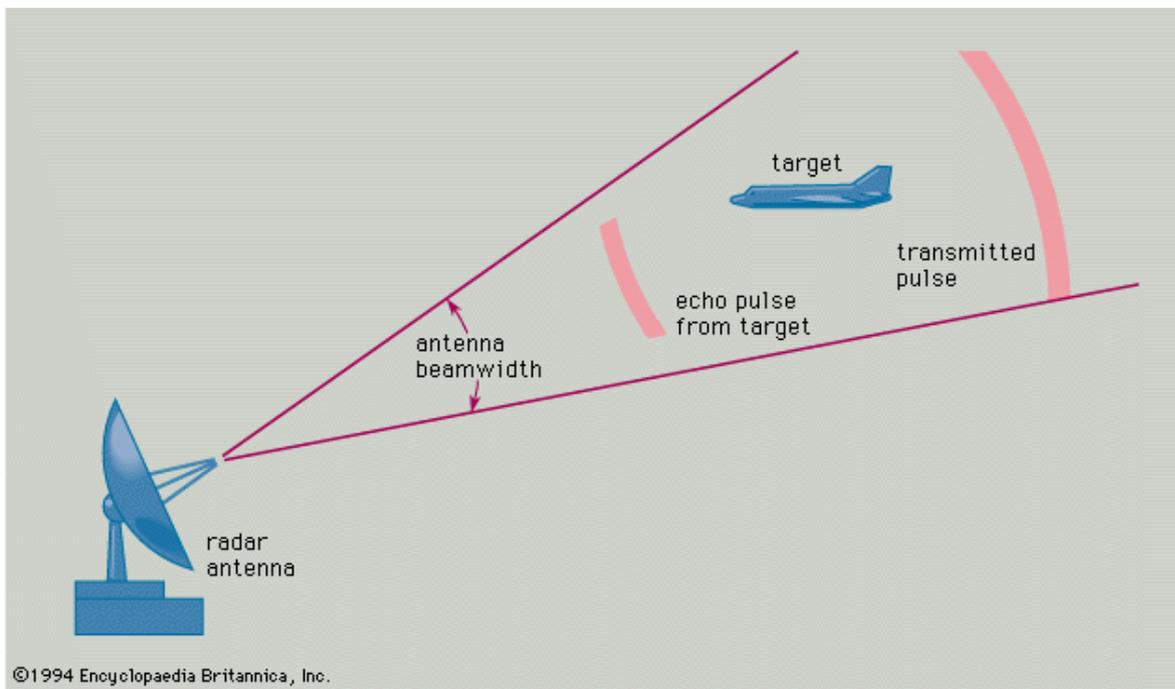


Ilustración 2-1 Funcionamiento básico de un radar primario.

2.1 Aerogeneradores

Para tener una idea previa de las características generales que se dan en los aerogeneradores, las cuales son muy variables, hemos sido muy conservadores y hemos elegido modelos de gran tamaño para situarnos en el peor de los casos. Los modelos elegidos son los siguientes:

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA A SIMULAR

Tabla 1 Características físicas de los aerogeneradores

Modelo	Wobben E82/3000	Windey WD110-2000	Siemens Gamesa 5.0-145	SG	Siemens Gamesa SG 10.0-193
Diámetro rotor	82	110	145		193
Altura torre	78-138	80-100	Dependiente ubicación		Dependiente ubicación
Máxima velocidad rotor (rpm/min)	6 (min)-18 (max)	13,4	20 (aprox)		20 (aprox)
Potencia (kW)	3000	2000	5000		10000

Las especificaciones que más nos importan de estos aerogeneradores son.

- La altura total del aerogenerador, el radio del rotor más la altura de la torre, pues nos define cual es la zona de sombra generada tras este.
- Las dimensiones de las palas, las cuales definen la sección recta radar del aerogenerador.
- La velocidad máxima a la que se pueden mover las palas, ya que estas generan frecuencias Doppler debido a su movimiento.

2.2 Especificaciones del radar

El radar que hemos simulado es el radar ASR-12 de INDRA (ASR de las siglas *Airport Surveillance Radar*) el cual tiene las siguientes características.

Tabla 2 Especificaciones del radar

<i>Frequency</i>	<i>2.7 to 2.9 GHz</i>
<i>Frequency Diversity & Agility</i>	<i>2 frequencies (Long/short pulse) 75 MHz frequency diversity. Possible Exchange of frequencies for subsequent CPI</i>
<i>Peak power</i>	<i>19.2 Kw</i>
<i>RF TX &</i>	<i>Sectorize (1.4°)</i>
<i>Blanking</i>	<i>Synchronous clutter map</i>
<i>Pulse width</i>	<i>Short pulse: 1.2 μs Long pulse: from 60 to 90 μs</i>

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA A SIMULAR

<i>PRF</i>	<i>735 to 1300 Hz (custom-built)</i>
<i>Stability</i>	<i>62 dB</i>
<i>MTI improvement factor</i>	<i>55 dB</i>
<i>Sub-Clutter visibility</i>	<i>>42 dB (till 800 knots)</i>
<i>Instrumented range</i>	<i>60 nm or 80 nm</i>
<i>Detection range</i>	<i>>60 nm or >80 nm</i>
<i>Reliability</i>	
<i>Availability</i>	<i>99.999%</i>
<i>MTBCF</i>	<i>45,000 hours</i>
<i>MTRR</i>	<i>20 minutes</i>
<i>Resolution</i>	
<i>Range</i>	<i>230 m rms (short pulse)</i> <i>170 m rms (long pulse)</i>
<i>Azimuth</i>	<i>2.8° rms</i>
<i>Receiver</i>	
<i>Noise figure</i>	<i>2.35 dB</i>
<i>Sensitivity</i>	<i>-108 dBm (short pulse)</i> <i>-126 dBm (long pulse)</i>
<i>Dynamic range</i>	<i>84 dB at signal processor input (without pulse compression)</i>
<i>STC</i>	<i>3 stages (2 RF and digital)</i>
<i>ADC</i>	<i>14 bits @ 93.2144 MHz</i>
<i>Antenna</i>	
<i>Beams</i>	<i>1 transmit, 2 receive</i>
<i>Gain</i>	<i>34.5 dB (low beam)</i> <i>32.5 dB (high beam)</i>
<i>Azimuth beamwidth</i>	<i>1.35°</i>
<i>Elevation beamwidth</i>	<i>4.5° cosecant squared +40°</i>
<i>Rotation speed</i>	<i>12/15 rpm</i>
<i>Polarization</i>	<i>Linear (vertical)</i> <i>Circular (right hand)</i>
<i>Receiving channels</i>	<i>4 simultaneous</i>
<i>Processing</i>	
<i>Type</i>	<i>MTD-IV doppler filter bank</i>
<i>Filters</i>	<i>6/8 (low/high PRF) - 80 nm</i> <i>8/10 (low/high PRF) - 60 nm</i>

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA A SIMULAR

<i>False alarm control</i>	<i>Interference suppression/detect GO-CFAR, MTAT, MTAC Clutter and geo-censor map Anomalous prop detection</i>
<i>Weather channel</i>	<i>Ground clutter suppression filters US-NWS 6 level detection</i>
<i>Capacity</i>	<i>1000 plots/600 tracks per scan</i>

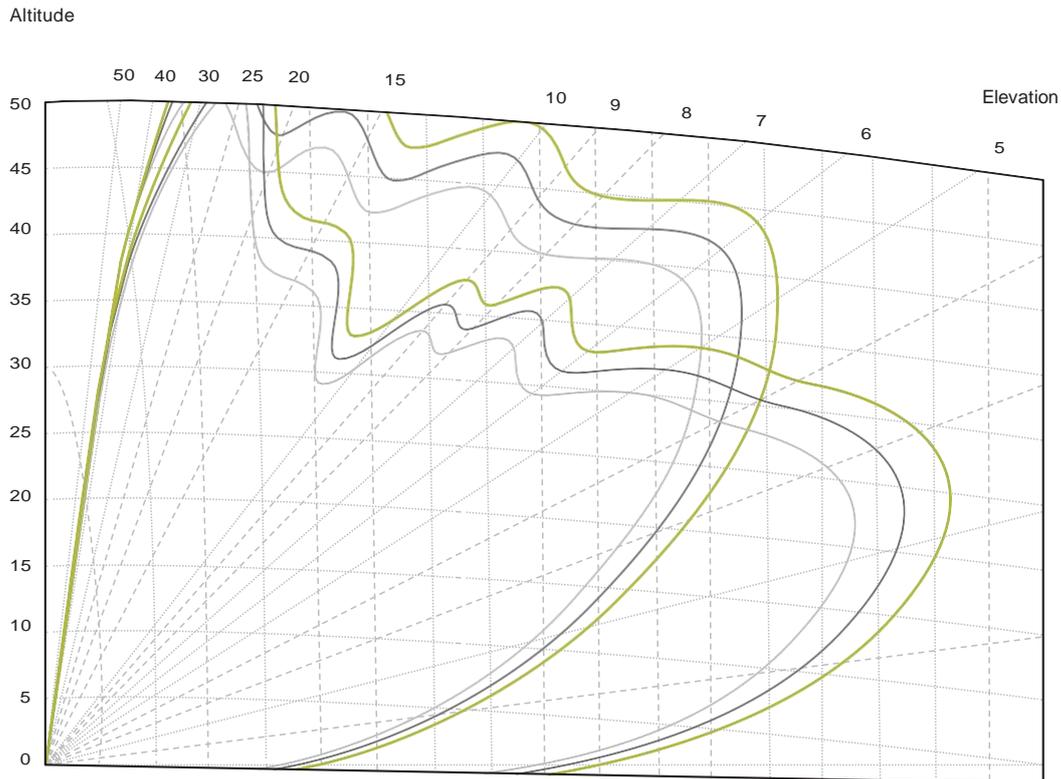


Ilustración 2-2 Diagrama de radiación de la antena

2.3 Sección Recta Radar

Un radar detecta y rastrea un blanco, también puede identificarlo, por las características que posee la señal del eco reflejado. Esto implica que, si podemos describir o cuantificar el eco, sobre todo en términos físicos como tamaño, forma y orientación, obtendríamos una simulación mucho más realista. Para ello se define la sección recta radar del blanco (RCS por sus siglas en inglés, *Radar Cross Section*).

La sección recta radar es, desde el punto de vista del blanco, el parámetro más importante de un radar, puesto que viene a desempeñar en el sistema radar el mismo papel que la forma o el color desempeñan para la vista humana, es decir, la forma con la que el radar ve al objetivo. Para estudiar los aspectos de la sección recta radar, sobre todo su dependencia con la geometría, se considera como blanco de referencia una

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA A SIMULAR

esfera de radio A que difracta por igual la energía electromagnética en todas las direcciones del espacio.

Las secciones rectas radar de los aerogeneradores dependen principalmente de sus dimensiones, de su orientación respecto al radar y del instante en el giro de las palas. Debido a esto, para simplificar el trabajo, en lugar de calcular la sección recta radar de un aerogenerador específico, se halla el rango de variación de $\sigma_{AC} / \sigma_{WT}$, donde σ_{AC} es la sección recta radar de la aeronave y σ_{WT} es la sección recta radar del aerogenerador. Además, hay que tener en cuenta que no toda la sección recta del radar genera frecuencias Doppler, por lo que al calcular esta variación del ratio hay que ajustarse únicamente a las partes móviles del aerogenerador.

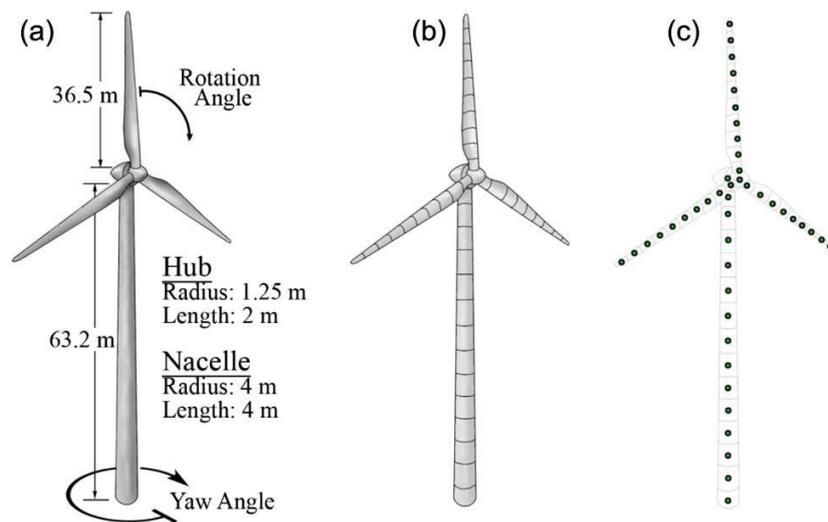


Ilustración 2-3 (a) Geometría de un aerogenerador de 2 MW. (b) Segmentación del aerogenerador. (c) Punto con el RCS situado en el centro de cada segmento.

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA A SIMULAR

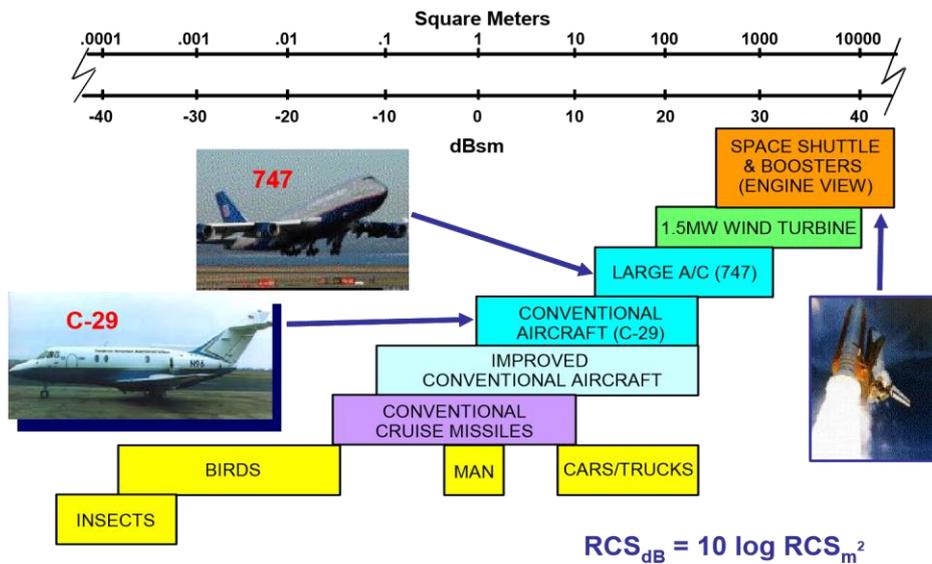


Ilustración 2-4 RCS de los objetos más comunes.

2.4 Efecto Doppler

El efecto Doppler se define como la variación de frecuencia aparente de una onda electromagnética provocada por el movimiento relativo de la fuente que genera la onda respecto a su observador. Para el radar, si un blanco se mueve con velocidad relativa Δv respecto a este, se apreciará en la onda reflejada una variación de la frecuencia respecto a la frecuencia del radar f_0 que viene dada por:

$$\Delta f = \frac{\Delta v}{c} * f_0$$

Donde c es la velocidad de la luz. La velocidad lineal en la punta de las palas se puede obtener mediante la fórmula:

$$v = \omega * r$$

Donde ω es la velocidad angular del rotor y r es la longitud de las palas (el radio del rotor si no disponemos de las medidas exactas de las palas). Al utilizar estas fórmulas para los modelos de aerogeneradores vistos en el capítulo 2.1, las frecuencias Doppler generadas son las mostradas en la tabla 3.

Tabla 3 Velocidades y frecuencias Doppler máximas de diferentes aerogeneradores.

Modelo	Wobben E82/3000	Windey WD110-2000	Siemens Gamesa 5.0-145	SG	Siemens Gamesa 10.0-193	SG

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA A SIMULAR

Velocidad máxima de las puntas	77,28 m/s 150,23 nudos	77,18 m/s 150,02 nudos	151,84 m/s 295,16 nudos	202,11 m/s 392,88 nudos
Espectro Doppler Banda L (1-2 GHz)	± 258 Hz	± 257 Hz	± 506 Hz	± 674 Hz
Espectro Doppler Banda S (2-4 GHz)	± 773 Hz	± 772 Hz	± 1519 Hz	± 2022 Hz

Para comprender mejor estos datos sería interesante saber que la velocidad mínima de despegue para las aeronaves comerciales más comunes suele estar entre los 200-250 km/h (unos 56 m/s), por lo que la velocidad radial de las palas entra en el rango de velocidades de las aeronaves convencionales y serán detectadas como un blanco móvil (con el diseño de un radar primario deben de ser detectadas). Eso las hace, en un principio, indistinguibles de las aeronaves y difíciles de filtrar en el radar.

En la tabla 3 se muestran las frecuencias Doppler máximas que se pueden llegar a alcanzar, sin embargo, dicha señal es variable en función de la posición relativa de la pala respecto al radar.

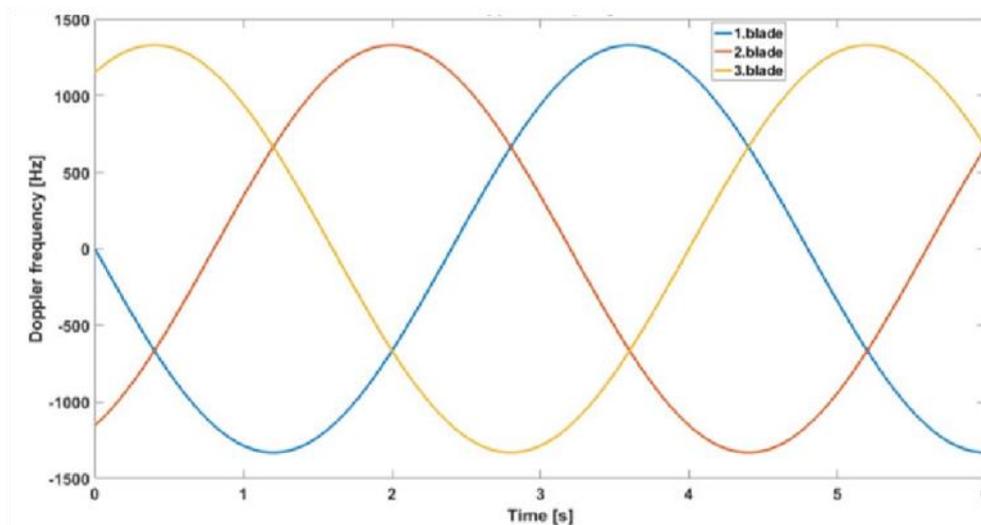


Ilustración 2-5 Dependencia de la frecuencia Doppler con el tiempo para tres álabes.

La figura 2.5 muestra la variación de la señal Doppler en el tiempo para un aerogenerador de tres palas. Se superponen tres señales desfasadas entre sí 120° , donde cada una corresponde a una pala. El periodo de fluctuación de la señal es:

$$T = \frac{rpm}{60} * N_{alabes}$$

2.5 Tipo de estudio

Eurocontrol establece una serie de recomendaciones en cuanto al nivel del estudio según la distancia de los aerogeneradores al radar. Estas recomendaciones se muestran a

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA A SIMULAR

continuación en la tabla 4.

Tabla 4 Tipo de estudio según la zona

Zona	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Descripción	0-500 m	500 m – 15 km en línea de visión del radar	Mayor de 15 km pero dentro del alcance máximo y en línea de visión del radar	Cualquier lugar dentro del alcance máxima pero fuera de la línea de visión del radar
Requisitos del estudio	Zona de seguridad	Estudio detallado	Estudio simple	Sin estudio

3. EFECTOS DE LOS AEROGENERADORES SOBRE EL RADAR PRIMARIO

En este apartado describiremos los efectos más importantes que los aerogeneradores provocan en el radar primario. Estos efectos pueden clasificarse en tres grandes grupos según su naturaleza.

- Debidos a la sombra producida por la oclusión física del aerogenerador.
- Debidos al efecto Doppler que producen las partes móviles del aerogenerador.

También convendría tener en cuenta que los efectos debidos a las reflexiones indirectas se explicarán de manera superficial pero no es necesario simularlas para el estudio simple. A continuación, se explican de manera teórica los problemas que se recogen en estos grupos.

3.1 Efectos de sombra

El mástil del aerogenerador y los componentes de la barquilla son partes de gran tamaño que crean una obstrucción física en las áreas de cobertura del radar primaria de igual manera que haría un edificio de tamaño equivalente. Dicha obstrucción, de gran sección radar, en la trayectoria del haz crea una región detrás del parque eólico en la que se disminuye la probabilidad de detección. Estas sombras, visibles en las pantallas de los radares meteorológicos y ATC, son el resultado de la difracción de las ondas electromagnéticas y se calculan en la simulación.

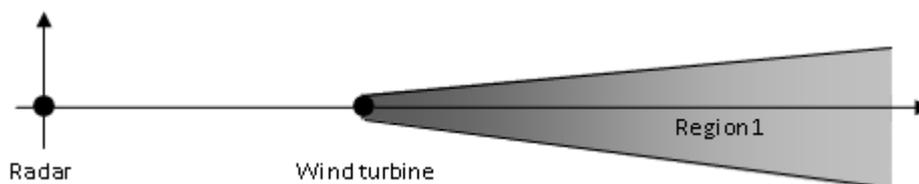


Ilustración 3-1 Vista en planta de la sombra del aerogenerador.

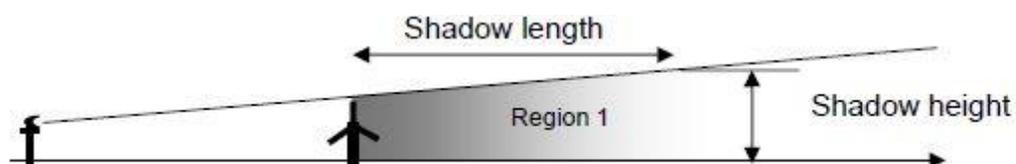


Ilustración 3-2 Vista lateral de la sombra del aerogenerador.

3.2 Falsos blancos y blancos intermitentes

Las puntas de las palas de los aerogeneradores crean un efecto Doppler al reflejar la señal de radar y además pueden llegar a moverse a velocidades similares a las de los

EFFECTOS DE LOS AEROGENERADORES SOBRE EL RADAR PRIMARIO

aviones. El procesamiento del MTI (por sus siglas en ingles *Moving Target Indicator*) del radar primario detecta esta señal reflejada como un objeto no estático, de modo que pueden aparecer los aerogeneradores como blancos en la pantalla de la misma manera que si la señal de una aeronave supera el umbral establecido.

La potencia de la señal será muy variable, debido al cambio en la orientación del aerogenerador, la posición de las palas y otros factores que hacen que la amplitud y el tamaño del eco generado varíen en cada barrido del radar. En lugares con generadores aislados, el retorno de las palas aparece como un punto fijo en la pantalla. Sin embargo, en sitios con varios aerogeneradores, el radar puede iluminar palas de mas de un aerogenerador en cada barrido. Esto crea la apariencia de que los retornos se mueven dentro del área del parque eólico a lo largo del tiempo, descrita a veces como un "centelleo". La probabilidad de que esto suceda depende, entre otros factores, del alcance y la resolución de azimut del radar.

Se ha observado que el *clutter* provocado por los parques eólicos tiene una potencia similar al retorno de un avión ligero. El procesamiento del umbral temporal de *clutter* funciona aumentando de manera escalonada el umbral de *clutter* para cada celda, hasta que se elimina lo que se aprecia como un blanco móvil cuya ubicación se mantiene siempre dentro de esa celda. Sin embargo, los rotores de los aerogeneradores cambian su orientación cada dos o tres minutos para aprovechar las rachas de viento mas fuertes. Los cambios en el retorno de la señal de los aerogeneradores provocan que, de manera periódica, el umbral se restituya a cero, causando el efecto de mostrar un blanco en movimiento dentro de una pequeña área. Es decir, los aerogeneradores tienden a aparecer y/o desaparecer a medida que el procesamiento del umbral temporal detecta que no hay movimiento, y luego vuelven a reaparecer cuando el aerogenerador se mueve en el plano azimutal para buscar el viento más fuerte. Podemos alterar el procesamiento de manera que los umbrales temporales tomen valores máximos o mínimos, lo que desembocaría en dos opciones, mostrar constantemente los parques eólicos o eliminarlos completamente. Ambas opciones tienen inconvenientes, ya que la primera crea más *clutter* y la última crea un agujero en la cobertura del radar.

3.3 Enmascaramiento de blancos por aumento de nivel de *clutter*

Los aerogeneradores causan un aumento significativo del nivel de *clutter*, que resulta en retornos no deseados del radar primario. El *clutter* debido a retornos de objetos estacionarios puede ser eliminado mediante un filtrado de paso alto en el procesamiento MTI, pero el efecto Doppler de las palas no puede filtrarse, detectando blancos no deseados que aparecen de distintas formas en sistemas con extracción de blancos o sin extracción de blancos:

EFFECTOS DE LOS AEROGENERADORES SOBRE EL RADAR PRIMARIO

- **Sistemas sin extracción de blancos.** Al aumentar el nivel de *clutter* en las celdas impedimos la detección de blancos reales. En sistemas donde se muestran en pantalla datos no procesados, el *clutter* debido a los aerogeneradores aparece en la pantalla como grandes manchas luminosas. De esta manera, cuando se detectan aviones que sobrevuelan los parques eólicos, la detección del blanco puede quedar completamente enmascarada en la pantalla.
- **Sistemas con extracción de blancos.** El *clutter* puede aparecer como una distribución esporádica de blancos individuales e intermitentes sobre el área del parque eólico. Estos también pueden enmascarar los blancos reales y originar problemas de seguimiento o tracking.

3.4 Pérdida de capacidad de detección por aumento del umbral CFAR

Dado que los aerogeneradores pueden tener secciones rectas radar (RCS) relativamente altas, pueden ocultar otros blancos en la misma celda de resolución o en celdas adyacentes. Los algoritmos de detección de blancos con un umbral de detección adaptativo, como el algoritmo CFAR (Constant False Alarm Rate), elevan los umbrales de detección a medida que aumentan los niveles de señal en la celda del blanco o celdas adyacentes. El algoritmo realiza un promedio del nivel de señal sobre un conjunto de celdas de clutter adyacentes a la celda del blanco, llamadas celdas de entrenamiento. Cuando un avión sobrevuela sobre un parque eólico, el RCS total acumulado de los aerogeneradores ubicados en las celdas de entrenamiento tenderá a ser más alto que el del avión, provocando la ocultación de la aeronave. Esta disminución de la sensibilidad causa la pérdida de detección especialmente de blancos pequeños.

3.5 . Pérdida de capacidad de detección por aumento del umbral AMTI

Existen algunos radares con capacidad de procesamiento AMTI (*Adaptive Moving Target Indication*). Esta técnica de procesamiento evalúa los retornos Doppler de fondo recibidos en cada celda y establece una velocidad umbral para la cual los retornos se eliminan. Como la velocidad de la punta de los aerogeneradores puede alcanzar velocidades similares a las de las aeronaves, es posible que las aeronaves detectadas en una misma celda AMTI que un aerogenerador puedan caer en el rango Doppler AMTI y ser descartadas.

3.6 Degradación de las capacidades de seguimiento (*tracking*)

La aparición de falsos blancos con trayectorias poco definidas puede generar falsas pistas (*tracks*) tanto en sistemas con o sin extracción de blancos (*plot extractor*). Por otra parte, la disminución de la capacidad de detección por aumento de los umbrales CFAR y AMTI puede enmascarar blancos verdaderos. Esto puede dar lugar a diversas anomalías en los algoritmos de seguimiento de pistas del radar, creando falsas pistas, pistas con discontinuidades, pistas que se desvían de la real al sobrevolar parques eólicos, etc.

3.7 Saturación del receptor

Los receptores de radar requieren un rango dinámico amplio para poder detectar la energía reflejada por aviones grandes y pequeños. Sin embargo, si un obstáculo como un aerogenerador refleja una cantidad significativa de energía, el receptor puede ser empujado más allá de su rango dinámico y saturarse. Este efecto no se limita a los aerogeneradores, sino que también puede ser causado por obstáculos grandes dependiendo de su tamaño y su distancia al radar. Se sabe que la probabilidad de saturación del receptor generada por un aerogenerador es baja; sin embargo, también se debe tener en cuenta esta posibilidad.

3.8 Reflexiones indirectas

El radar no solo recibe las reflexiones directas de los aerogeneradores, sino que existe un mecanismo multitrayectoria que, potencialmente, puede generar reflexiones indirectas a través de los aerogeneradores. Las reflexiones multitrayectoria también pueden producirse con el terreno o con los obstáculos. La diferencia más importante es que, debido a las partes móviles de los aerogeneradores, el cambio de dirección que experimenta la onda al reflejarse sobre aerogenerador no es sencillo de predecir, tal como sucede en una superficie lisa donde el ángulo incidente es igual al ángulo reflejado. Por ello, podría decirse que más que una reflexión de energía se produce una “dispersión” de energía.

El efecto de estas reflexiones puede traducirse en falsos blancos si la señal reflejada directa y la indirecta no solapan en el tiempo. En el caso de que solapen, pueden producirse errores en la determinación de la distancia y azimut.

Según EUROCONTROL pueden producirse cuatro casos diferentes de reflexiones en los aerogeneradores:

- **Caso de reflexión 1** (figura 3.3). La señal del radar se refleja a través del aerogenerador y el retorno del blanco se refleja también a través del aerogenerador. La señal reflejada se recibe a través del haz principal de la antena del radar.

EFFECTOS DE LOS AEROGENERADORES SOBRE EL RADAR PRIMARIO

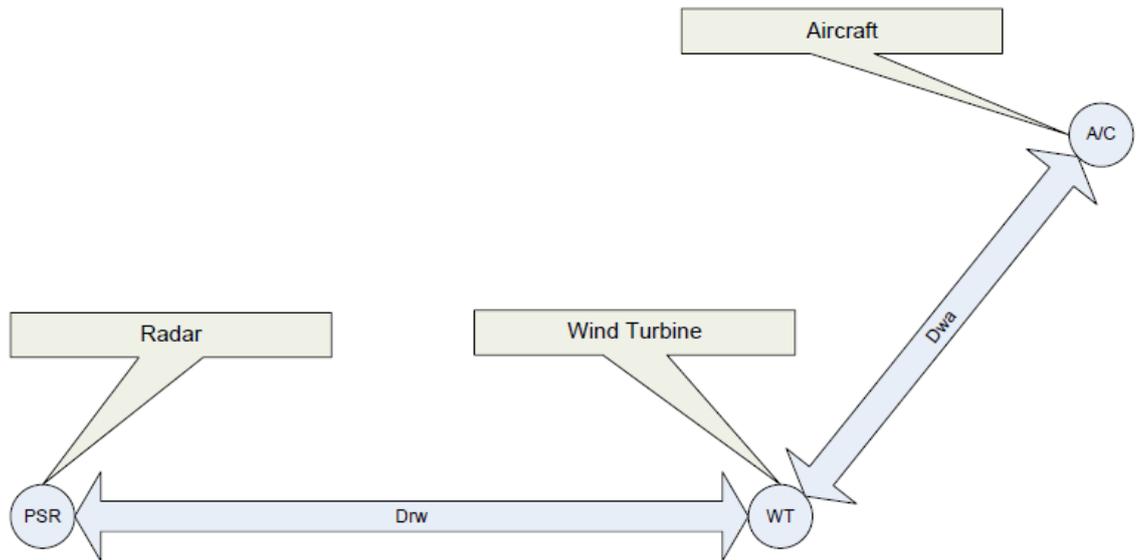


Ilustración 3-3 Caso de reflexión 1

- **Caso de reflexión 2** (figura 3.4)— La señal del radar se refleja a través del aerogenerador y el retorno del blanco es directo. Como la señal reflejada no se produce necesariamente con un ángulo de azimut igual al del aerogenerador, la señal reflejada se recibe a través de los lóbulos laterales del radar.

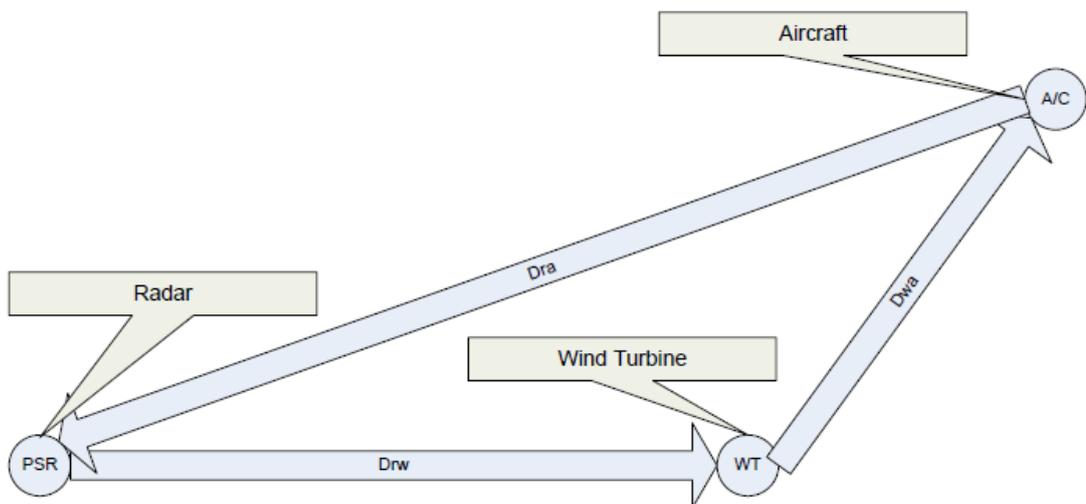


Ilustración 3-4 Caso de reflexión 2

- **Caso de reflexión 3** (figura 3.5)— La señal del radar al blanco es directa y el retorno del blanco se refleja a través del aerogenerador. Como la señal reflejada no se produce necesariamente con un ángulo de azimut igual al del aerogenerador, la señal reflejada se recibe a través de los lóbulos laterales del radar.

EFFECTOS DE LOS AEROGENERADORES SOBRE EL RADAR PRIMARIO

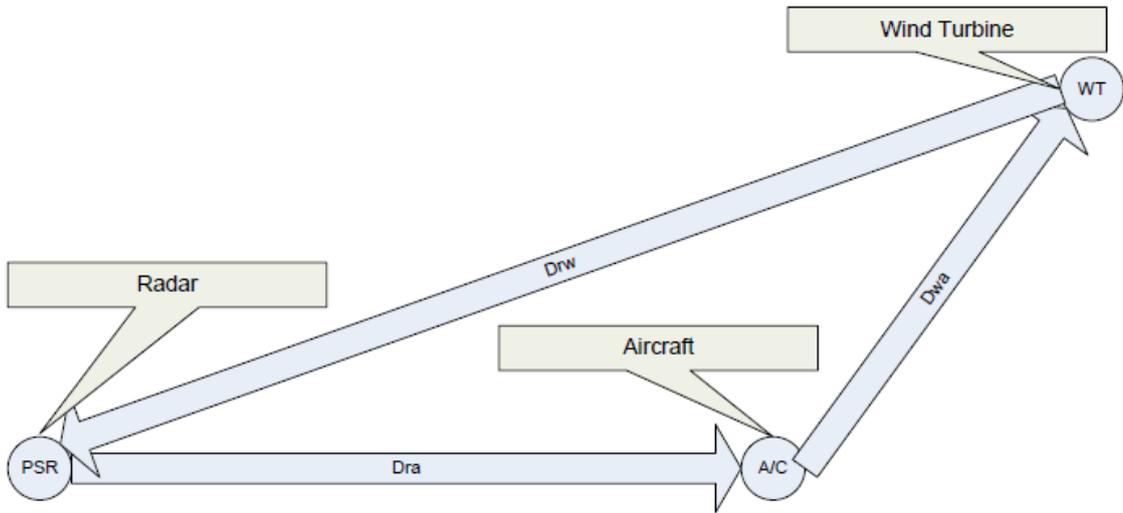


Ilustración 3-5 Caso de reflexión 3

- **Caso de reflexión 4** (figura 3.6) — La señal del radar al blanco es directa y el retorno del blanco se refleja a través del aerogenerador y el blanco. Como la señal reflejada se produce en el azimut del aerogenerador, la señal reflejada se recibe a través del haz principal de la antena del radar.

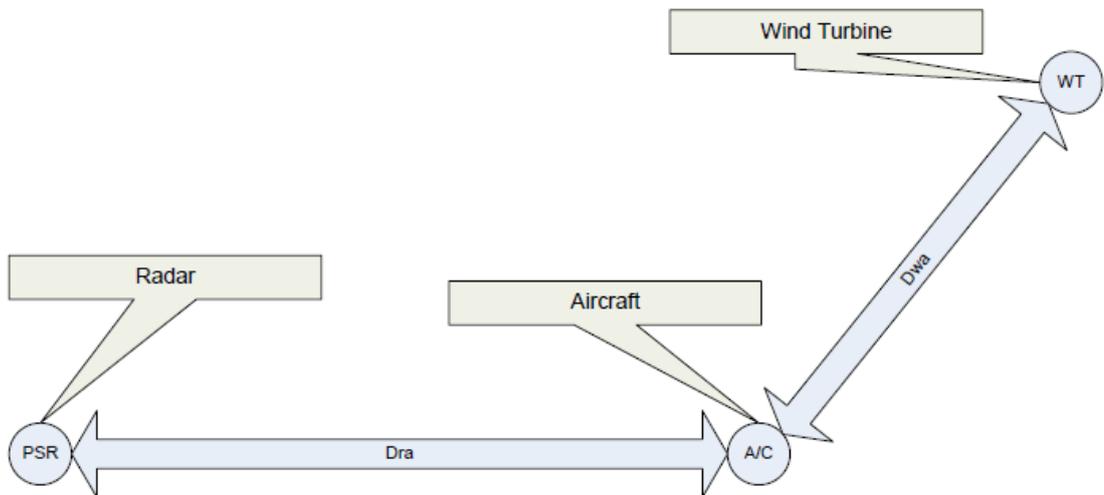


Ilustración 3-6 Caso de reflexión 4

4. ENTORNO DE SIMULACION

En este apartado explicaremos como hemos hecho la simulación de cada problema y las consideraciones que hemos tenido en cuenta para cada uno de ellos.

4.1 Sombra producida por el aerogenerador

Comenzaremos calculando la altura de la sombra. Dicha altura es calculada simplemente considerando la geometría de la turbina y el radar mostrada en las figuras 3.1.1 y 3.1.2, teniendo en cuenta la altura máxima de la turbina, la curvatura de la tierra (véase la figura 4.1.1 siguiente), el radio de la tierra y el hecho de que las ondas electromagnéticas no se propagan en línea recta por la superficie, por lo que se aplica un factor k para calcular el ángulo central.

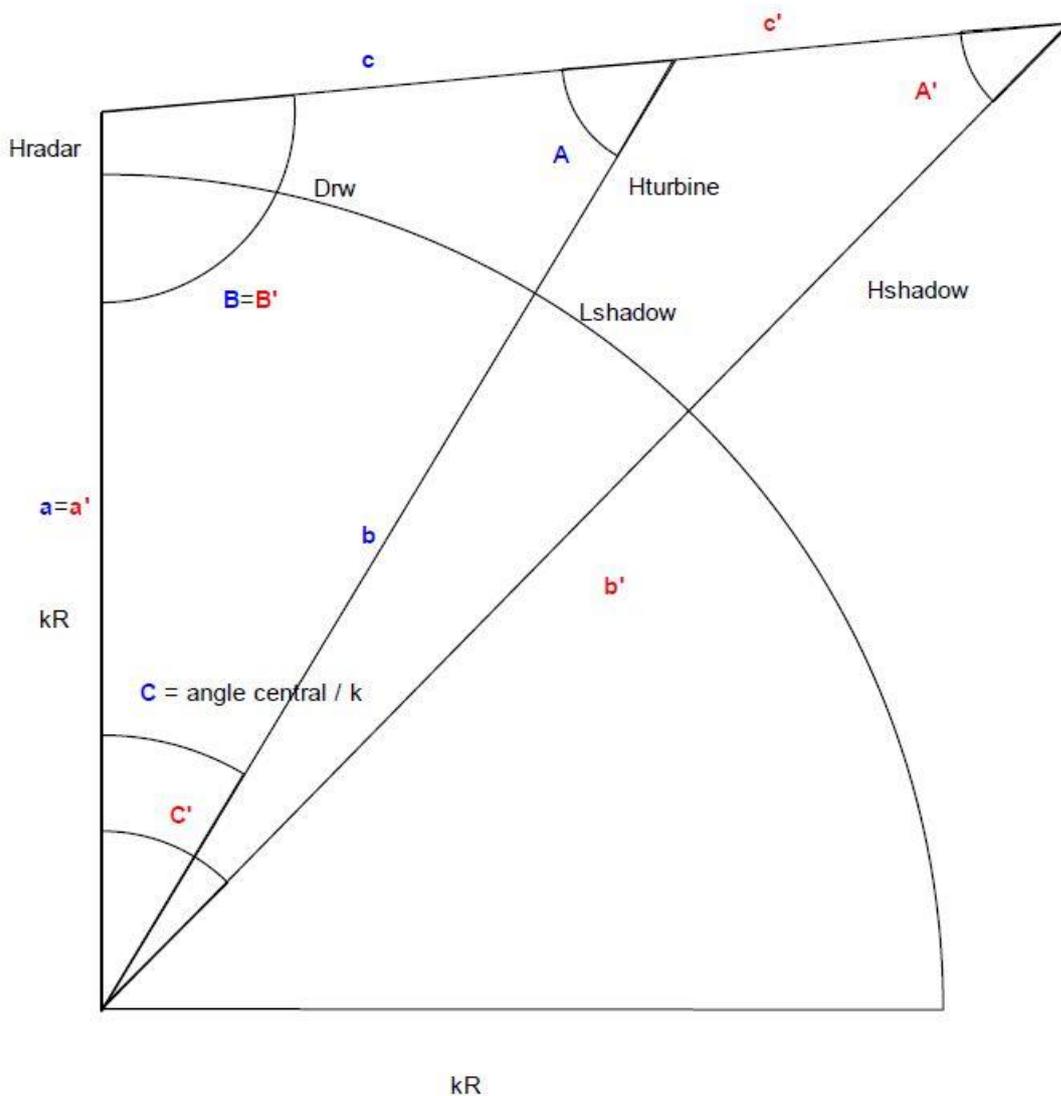


Ilustración 4-1 Esquema para calcular la altura de la sombra

De manera que:

$$a = k * R + H_{radar}$$

ENTORNO DE SIMULACION

$$b = k * R + H_{turbine}$$

$$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2 * a * b * \cos(C)}$$

$$B = \arccos\left(\frac{a^2 - b^2 + c^2}{2 * a * c}\right)$$

$$C = \frac{D_{rw}}{k * R}$$

$$C' = \frac{D_{rw} + L_{shadow}}{k * R}$$

$$B' = B$$

$$A' = \pi - B' - C'$$

$$b' = a' * \frac{\sin(B')}{\sin(A')}$$

Con estas ecuaciones la altura de la sombra puede ser calculada de la siguiente manera

$$H_{shadow} = b' - k * R$$

Donde los símbolos utilizados tienen el siguiente significado y valor:

Tabla 5 Simbología de las ecuaciones

R	Radio de la tierra en la posición del radar (m)
H _{radar}	Altura geodésica del radar (m)
H _{turbine}	Altura geodésica de la turbina (m)
H _{shadow}	Altura geodésica de la sombra en el umbral (m)
L _{shadow}	Longitud de la sombra (m)
k	Factor que tiene en cuenta que las ondas electromagnéticas no se propagan en línea recta
D _{rw}	Distancia del radar al aerogenerador (m)

Ahora procedemos a calcular la anchura de la zona de sombra. Una sección recta radar ordinaria del efecto de la sombra se muestra en la figura 4.2 donde se asume la reflexión de un objeto metálico, por lo que la señal directa y reflejada son antifase.

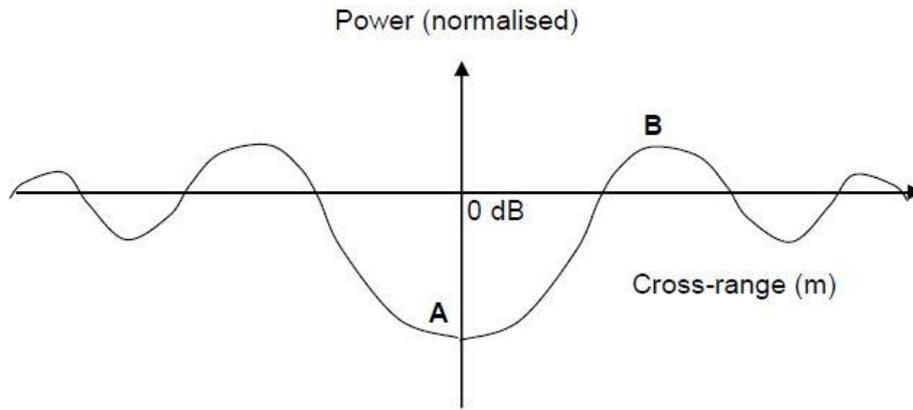


Ilustración 4-2 Diagrama de sección recta radar de una sombra

En el punto A la diferencia de la trayectoria es cero así que las señales se combinan destructivamente provocando la sombra más intensa; en el punto B, donde la diferencia de la trayectoria es igual a $\lambda/2$, se combinan constructivamente ocasionando un máximo. Obsérvese que los máximos se dan en múltiplos impares de $\lambda/2$, donde la diferencia de trayectoria es $(2n+1)*\lambda/2$. Los máximos se vuelven cada vez más débiles porque la señal de interferencia es más débil a grandes ángulos fuera de la dirección de dispersión. Una estimación conservadora del ancho de la sombra es la línea de puntos formada por B; la geometría para calcular esto se muestra en la figura 4.3:

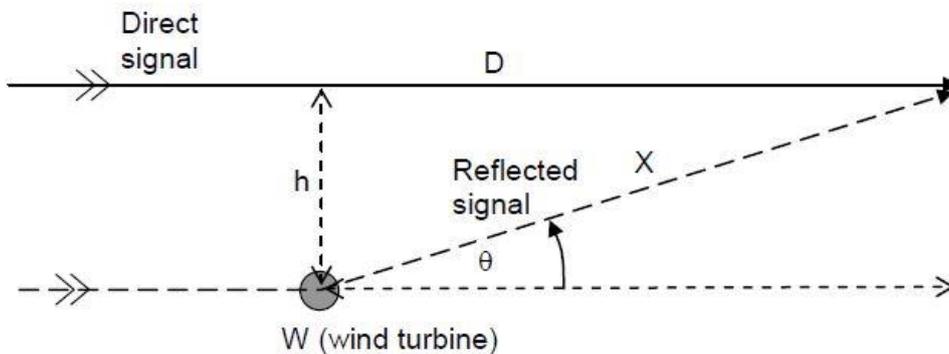


Ilustración 4-3 Diferencia de trayectoria para calcular el ancho de la sombra

La diferencia de trayectoria, Δ , entre la señal directa y reflejada en el receptor es dada por:

$$\Delta = X - D = \sqrt{h^2 + D^2} - D$$

Así que la línea de puntos que define el ancho de la sombra a una distancia D detrás de la turbina se resuelve asumiendo que la diferencia de trayectoria es $\lambda/2$ y resolviendo para la mitad del ancho, h:

$$\frac{\lambda}{2} = \sqrt{h^2 + D^2} - D$$

$$h = \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2} + D\right)^2 - D^2}$$

Si λ es mucho más pequeña que D , como es el caso, la ecuación anterior se puede simplificar a:

$$h = \sqrt{\lambda * D}$$

4.2 Simulación del radar y sus filtros de señal

En este apartado vamos a simular el procesamiento digital que generan los retornos del radar para determinar si los efectos que los aerogeneradores provocan sobre el radar primario, explicados en el capítulo 3, dependen de su posición respecto a este e intentar averiguar cuáles son los factores que influyen de manera más grave. Para ello, hemos utilizado el software de Matlab (versión 2018) que nos permite crear un entorno realista gracias al paquete *Phased Array System Toolbox*. Dicho paquete contiene una serie de objetos de software correspondientes a los componentes del radar, los blancos, el *clutter*, el filtro MTI y el procesamiento CFAR:

```
phased.Platform() ;
phased.RectangularWaveform() ;
phased.IsotropicAntennaElement() ;
phased.Radiator() ;
phased.Collector() ;
phased.Transmitter() ;
phased.ReceiverPreamp() ;
phased.RadarTarget() ;
phased.ConstantGammaClutter() ;
phased.CFARDetector() ;
```

Con ellos se ha modelado el radar elegido para la simulación, cuyas especificaciones se listan en el capítulo 2.2, blancos e interferencias de tipo Swerling 1 y el *clutter* de gamma constante. Antes de comenzar con el filtro MTI explicaremos en que consiste el modelo Swerling.

4.2.1 Modelos Swerling

Los modelos Swerling fueron introducidos por Peter Swerling para describir las propiedades estadísticas de las secciones rectas radar, de esta manera podemos identificar cinco tipos de modelos Swerling:

- **Swerling 0:** la RCS es constante.
- **Swerling 1:** la RCS varía entre dos barridos y superficie que causa poca dispersión. Distribución Chi cuadrado con dos grados de libertad. Se ha

ENTORNO DE SIMULACION

comprobado que este modelo es el más acertado para calcular la RCS de objetos en la aviación.

- **Swerling 2:** la RCS varía entre dos pulsos del mismo barrido y superficie que causa poca dispersión. Distribución Chi cuadrado con dos grados de libertad.
- **Swerling 3:** la RCS varía entre dos barridos y superficie que causa mucha dispersión. Distribución Chi cuadrado con cuatro grados de libertad.
- **Swerling 4:** la RCS varía entre dos pulsos del mismo barrido y superficie que causa mucha dispersión. Distribución Chi cuadrado con cuatro grados de libertad.

4.2.2 Filtro MTI

Tiene como objetivo descartar las señales de blancos que no se están moviendo o que lo hacen muy lentamente, tales como edificios, arboles, terreno, lluvia, etc... Por conveniencia, hemos incluido dentro de este objeto software otros tres componentes del radar:

- **Integrador de pulsos:** 10 pulsos.
- **Filtro adaptado** (*Matched Filter*) a la modulación del pulso empleada.
- **Filtro de frecuencia:** cancelador de tres pulsos. Con este filtro eliminamos las señales que no se mueven o lo hacen muy despacio.

Además, para evitar puntos ciegos en el radar utilizaremos 2 PRF superpuestas, de manera que si algún blanco se mueve con la misma frecuencia Doppler a la que se producen los nulos para una sola PRF, este no queda ocultado.

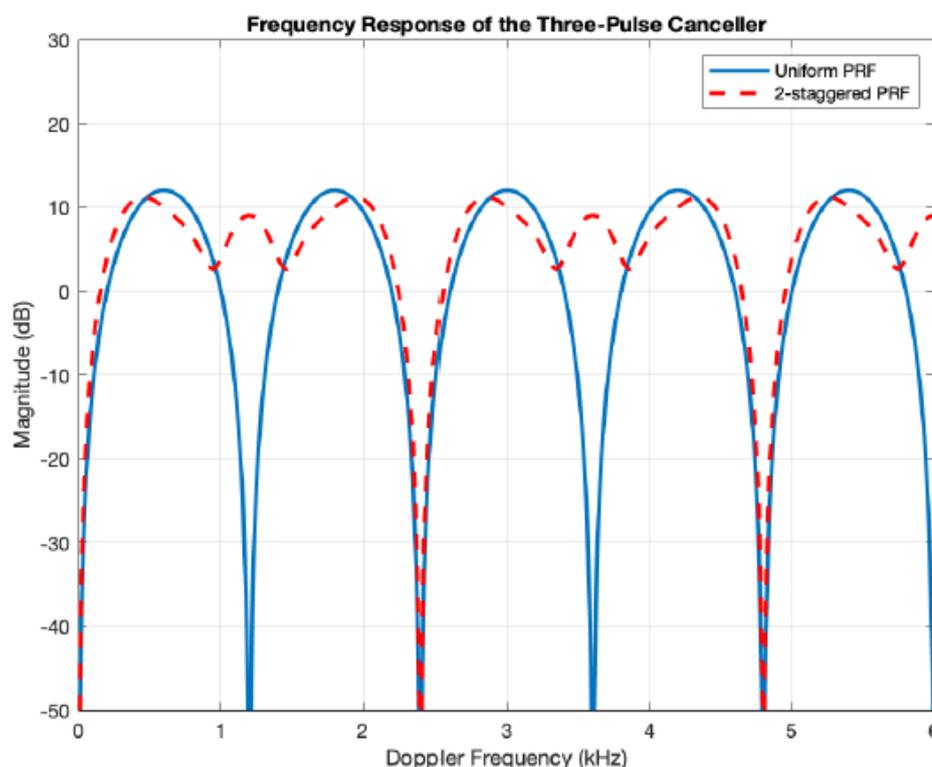


Ilustración 4-4 Respuesta en frecuencia del cancelador de tres pulsos

ENTORNO DE SIMULACION

Para entenderlo de manera más simple, las señales de entrada y salida del filtro MTI, así como la interferencia de los aerogeneradores se esquematizan en la figura 4.5. En ellas puede verse el efecto del procesado MTI que aumenta de manera muy pronunciada la relación señal ruido, destacando los blancos sobre el *clutter*.

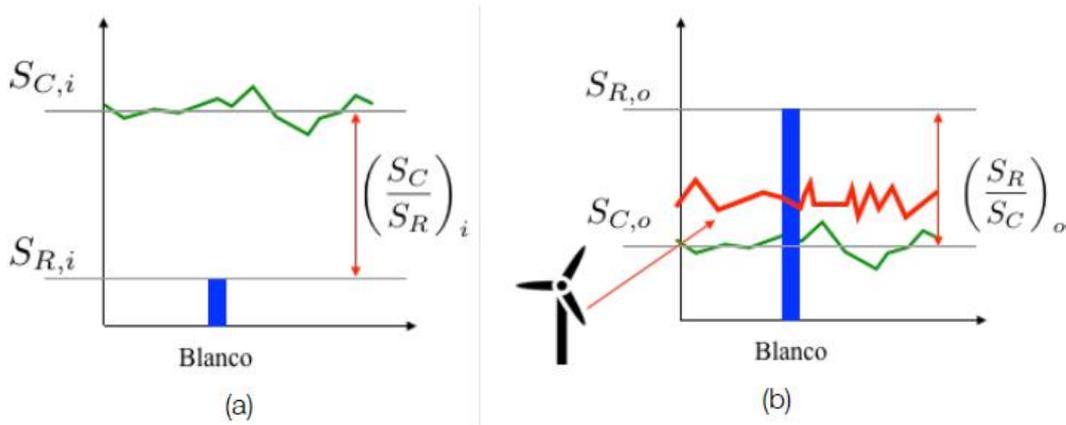


Ilustración 4-5 Señal a la entrada (a) y señal a la salida (b).

4.2.3 Procesamiento CFAR

El CFAR es un algoritmo adaptativo que permite discriminar los ecos de los blancos que se encuentran en una zona de ruido y *clutter* cuyos niveles son variables. En nuestro caso, utilizaremos el algoritmo CA-CFAR (*Cell Averaging- Constant False Alarm Rate*). Este algoritmo es una manera de detectar blancos estableciendo un umbral de detección que se obtiene mediante un promediado de las celdas *clutter* adyacentes a la celda evaluada o CUT (*Cell Under Test*). Las celdas adyacentes se denominan celdas de entrenamiento (*Training Cells*). Además, el algoritmo excluye del cálculo un número de celdas previamente establecido llamadas celdas de guarda (*Guard Cells*) que son las celdas más cercanas a la celda evaluada.

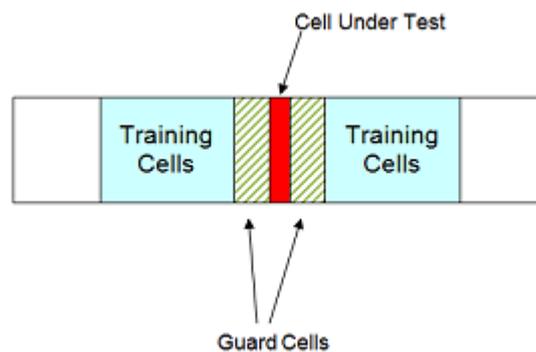


Ilustración 4-6 Esquema del procesamiento CA-CFAR

Finalmente, el esquema del procesado completo de la señal quedaría de la siguiente manera.

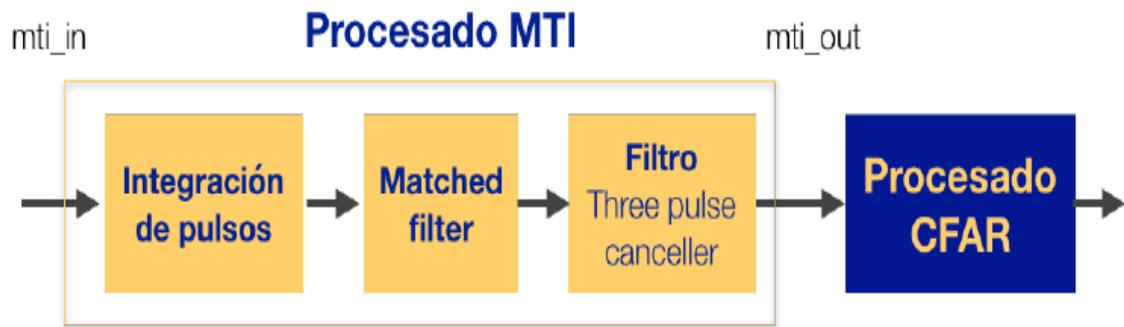


Ilustración 4-7 Esquema del procesamiento de la señal.

5. RESULTADOS DE LA SIMULACION

En este apartado detallaremos todos los datos utilizados en la simulación, así como los resultados de esta.

5.1 Sombra del aerogenerador

Para el cálculo de la sombra del aerogenerador se han utilizado las ecuaciones escritas en el capítulo 4.1 tomando los siguientes datos.

Tabla 6 Datos para el cálculo de la sombra

Altura del radar (H_{radar})	15 m
Altura del aerogenerador (H_{turbine})	120 m
Radio de la tierra	6731000 m
Longitud de la sombra (L_{shadow})	100000 m
Distancia del radar al aerogenerador (D_{rw})	16000 m
k	4/3
λ	0.1071

Los resultados son los siguientes:

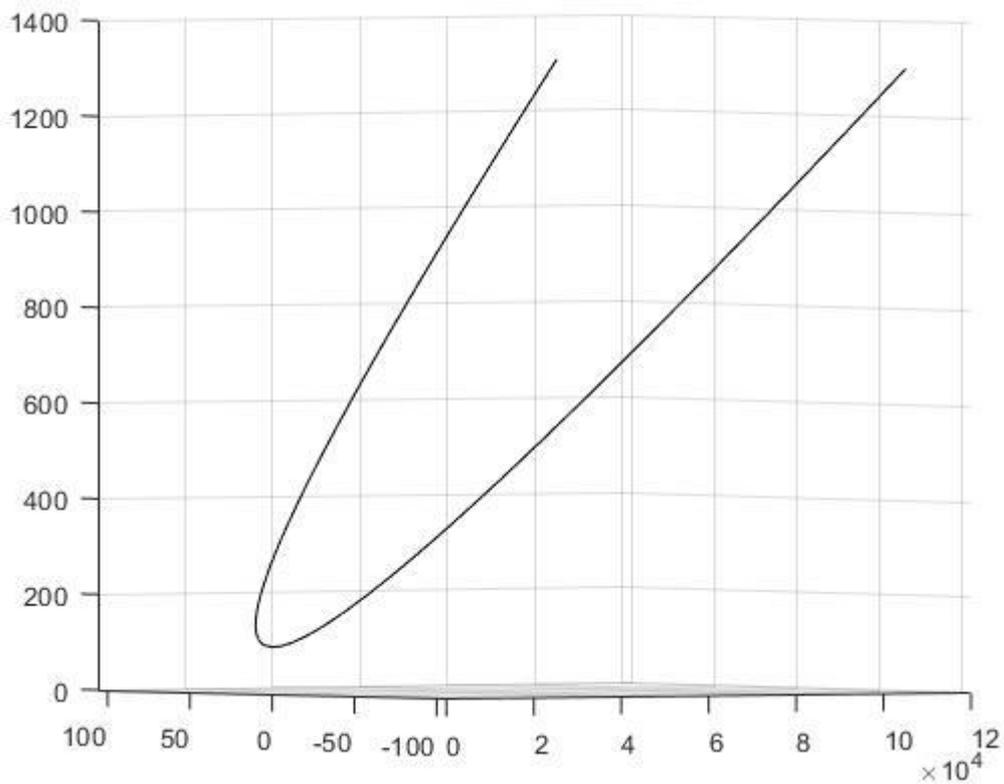


Ilustración 5-1 Vista general de los límites de la sombra.

RESULTADOS DE LA SIMULACION

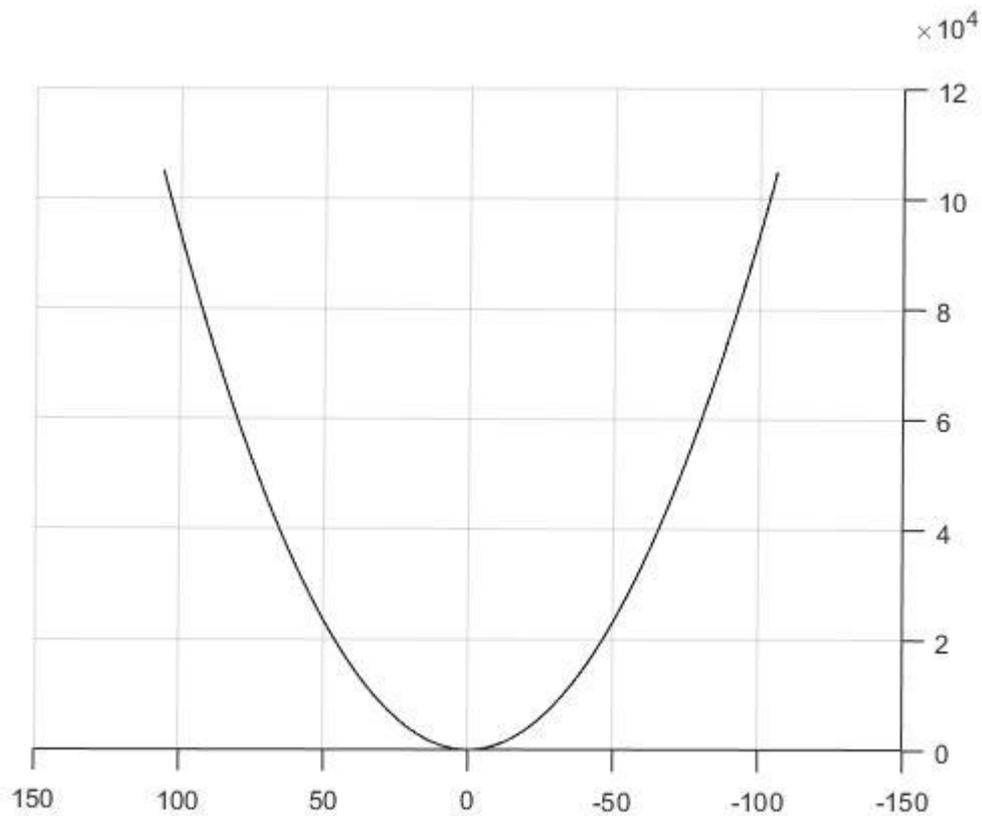


Ilustración 5-2 Vista en planta de la sombra.

Donde:

- $H_{\text{shadow}} = 1307.3 \text{ m}$
- Anchura máxima de la sombra (h_{max}) = 106.3

La sombra que creada por los aerogeneradores es, en proporción al terreno que cubren, muy pequeña, ya que en los cien kilómetros que cubre la sombra su altura no supera los 1307 m y su anchura total los 212.6 m. Por lo que solo una mala planificación al situar la granja eólica podría suponer un problema para la funcionalidad del radar primario.

5.2 Filtro MTI y algoritmo CFAR

Para la simulación del filtro MTI y el algoritmo CFAR hemos asumido las siguientes características para el sistema.

El blanco que queremos detectar, la aeronave, tiene una velocidad $V_a = 150 \text{ m/s}$ cuya sección recta radar es $RCS_a = 70 \text{ m}^2$ con un patrón de fluctuación Swerling 1. Las distancias al blanco se han hecho variar en el rango $D = [15 \dots 30] \text{ km}$. La altura del blanco se ha hecho variar en el rango $H_t = [0.5 \dots 5] \text{ km}$.

Las interferencias, los aerogeneradores, se han modelado con una altura $H_w = 120 \text{ m}$ cuya velocidad corresponde a la velocidad de las palas y que se han fijado en 12 m/s. La sección recta radar de los aerogeneradores, RCS_w , se han hecho variar en función del ratio RCS_w / RCS_a , es decir, $RCS_w = [0.1 \dots 1.3] * RCS_a$. También hemos considerado

RESULTADOS DE LA SIMULACION

como aceptable para modelar su patrón de fluctuación, el modelo de blanco Swerling 1. El número de interferencias que abarcan las celdas de entrenamiento del algoritmo CFAR se ha hecho variar entre 1, 2 y 4, aunque como comprobaremos más adelante, solo una interferencia es suficiente para ocultar el blanco. Las interferencias se sitúan a 681 metros unas de las otras, así como de la aeronave (de su *slant-range*) que siempre se encuentra en el centro de estas. Elegimos esta distancia para mantenerlas por fuera de las celdas de guarda y así evitar que se ignore esta información.

Por último, la resolución de simulación se ha escogido que sea aproximadamente 8 veces menor que la resolución del radar primario (el ASR-12), es decir: $230/8=28.75$ m. Para ello debemos redondear la frecuencia de muestreo a un múltiplo exacto de la PRF que proporcione esta resolución. En este caso, la frecuencia de muestreo queda establecida en 5.28 MHz y la resolución en 28.39 m. Sin embargo, el algoritmo CFAR no trabajara con celdas de esta resolución, sino con celdas de la resolución del radar cuya longitud es $8*28.39 = 227.12$ m.

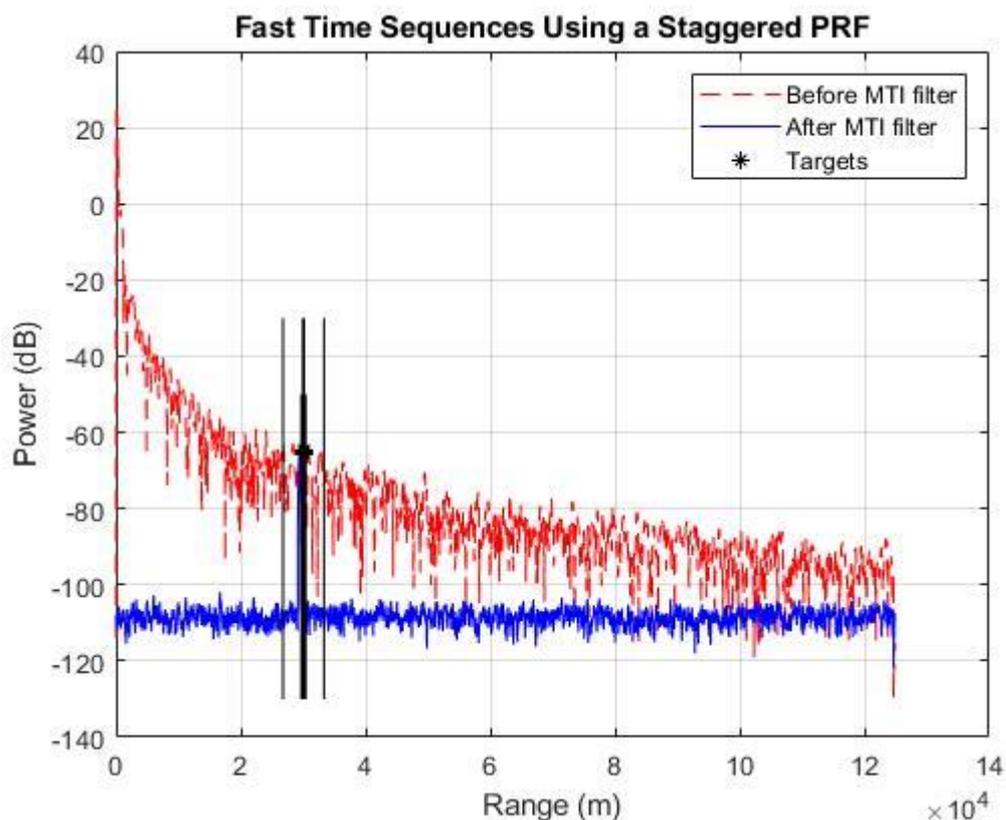


Ilustración 5-3 Señal recibida antes y después del filtro (una interferencia y ratio $RCS_w/RCS_a = 1.1$)

La figura 5.3 muestra el nivel de potencia del retorno de la señal en función de la distancia. La señal roja es la señal antes de pasar por el filtro MTI y la azul es la señal ya filtrada. Se puede observar la importancia de la señal del *clutter* ambiental y como se va

RESULTADOS DE LA SIMULACION

atenuando si no se hubiera filtrado. Gracias al filtro MTI, la potencia recibida de los blancos puede superar sin ningún problema a la del clutter.

En la figura 5.4 procedemos a hacer un aumento en la zona del blanco para poder ver con más definición la situación.

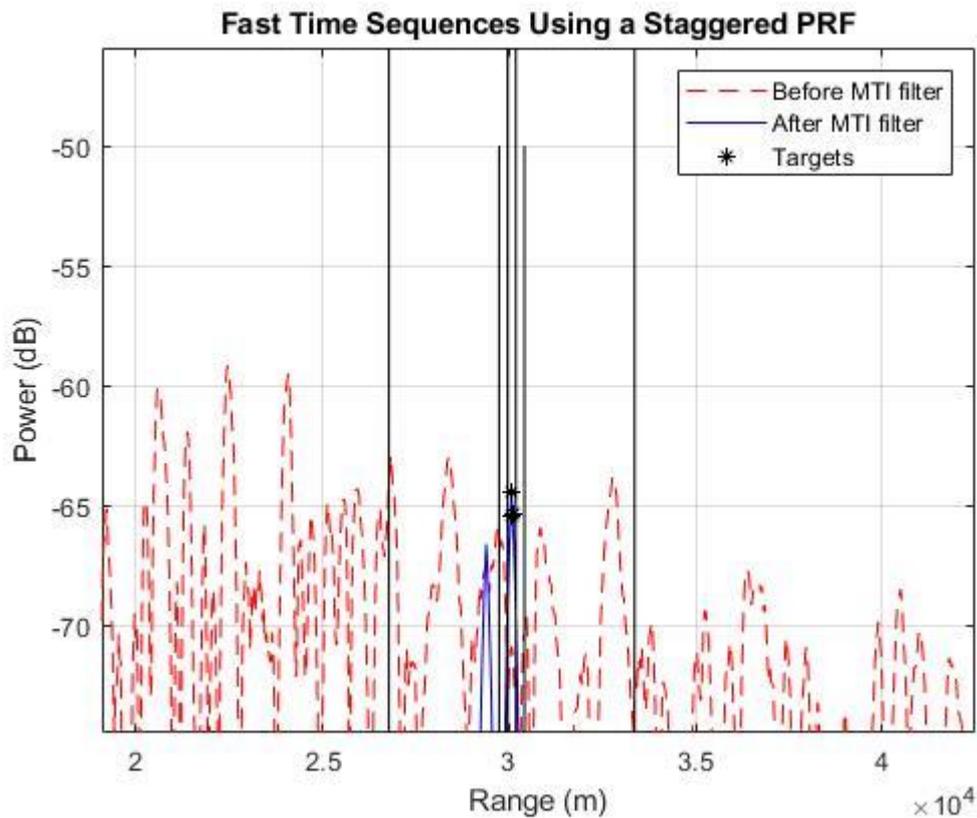


Ilustración 5-4 Señal recibida antes y después del filtro con zoom (una interferencia y ratio $RCS_w/RCS_a = 1.1$)

En esta imagen podemos observar los límites de las celdas de entrenamiento, las líneas verticales más alejadas, las celdas de guarda, las líneas verticales más bajas, así como de la celda en pruebas (CUT), las líneas verticales en el centro. Los picos de potencia en azul representan la interferencia y el blanco. Si el algoritmo CFAR detecta el blanco lo marca con un asterisco, en este caso, como solo estamos analizando con una interferencia, se detecta sin ningún problema la señal de la aeronave. Sin embargo, al añadir más interferencias puede cambiar el resultado. En las figuras 5.5 y 5.6 lo comprobamos.

RESULTADOS DE LA SIMULACION

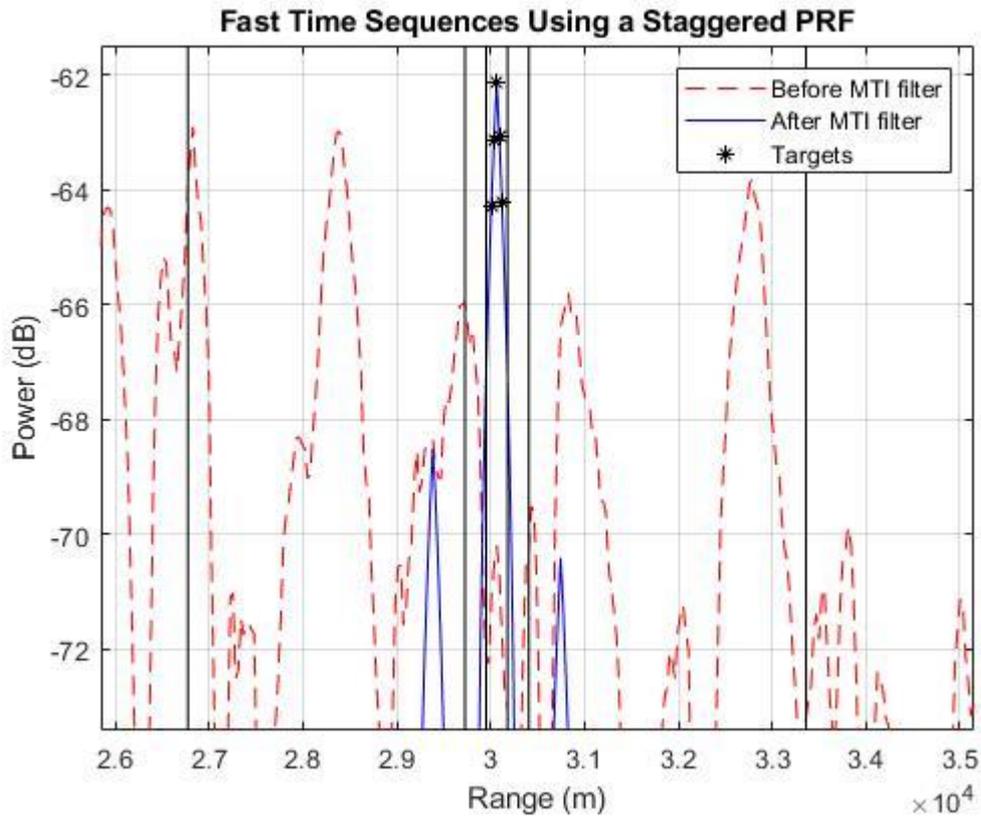


Ilustración 5-5 . Señal recibida antes y después del filtro con zoom (dos interferencias)

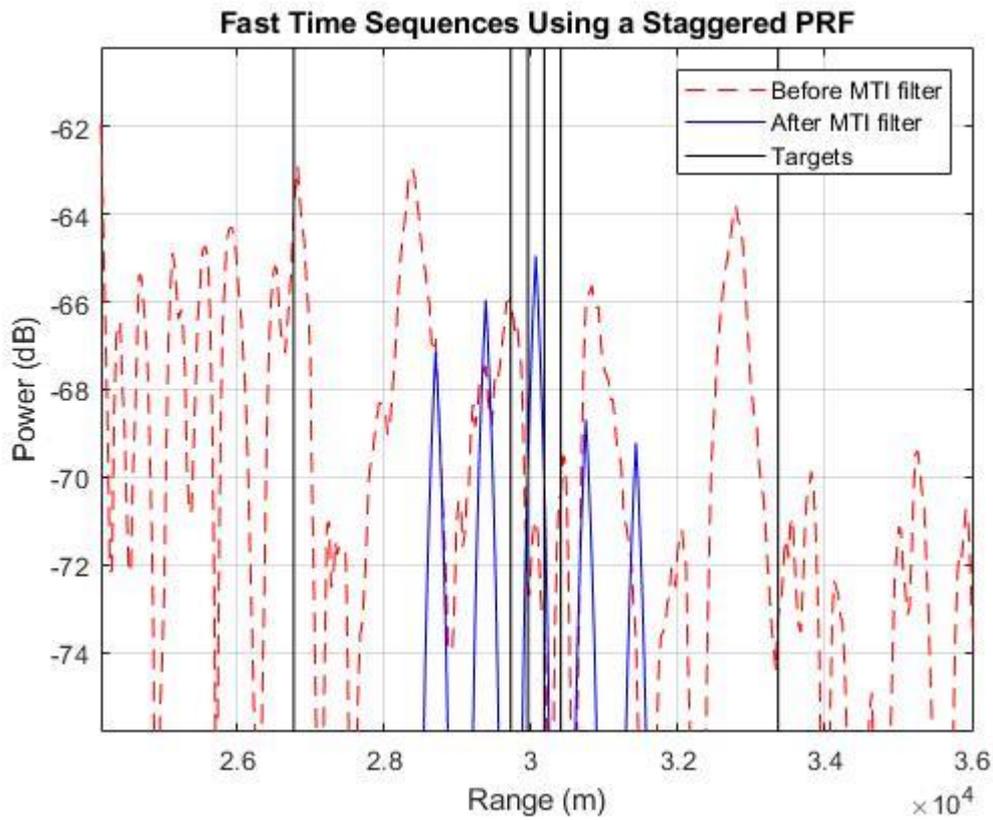


Ilustración 5-6 Señal recibida antes y después del filtro con zoom (cuatro interferencias)

Podemos observar que incluso con dos interferencias el algoritmo es capaz de distinguir

RESULTADOS DE LA SIMULACION

el blanco sin problemas, sin embargo, con cuatro interferencias no es capaz de detectar la aeronave, por lo que, a pesar de estar ahí, queda ocultada por las interferencias de los aerogeneradores.

Ahora procederemos a analizar la elevación del umbral CFAR para averiguar qué factores son los que influyen en la detección de blancos, a parte del número de interferencias total.

Para ello se ha realizado una simulación de Montecarlo en la que se calculan las probabilidades de detección y falsos blancos para diferentes ratios de sección recta radar entre el aerogenerador y el blanco, en el intervalo de distancias predeterminado anteriormente. Salvo para el caso en el que analizamos el efecto de la altura, en el resto se asume una altura constante para la aeronave de 2000 m. Dada la fluctuación en los resultados que provoca el modelo de blanco Swerling 1, el experimento se repite diez veces para cada distancia y para cada ratio. Posteriormente se realiza un filtrado de media móvil con un tamaño de ventana igual a 10.

Los resultados son los siguientes.

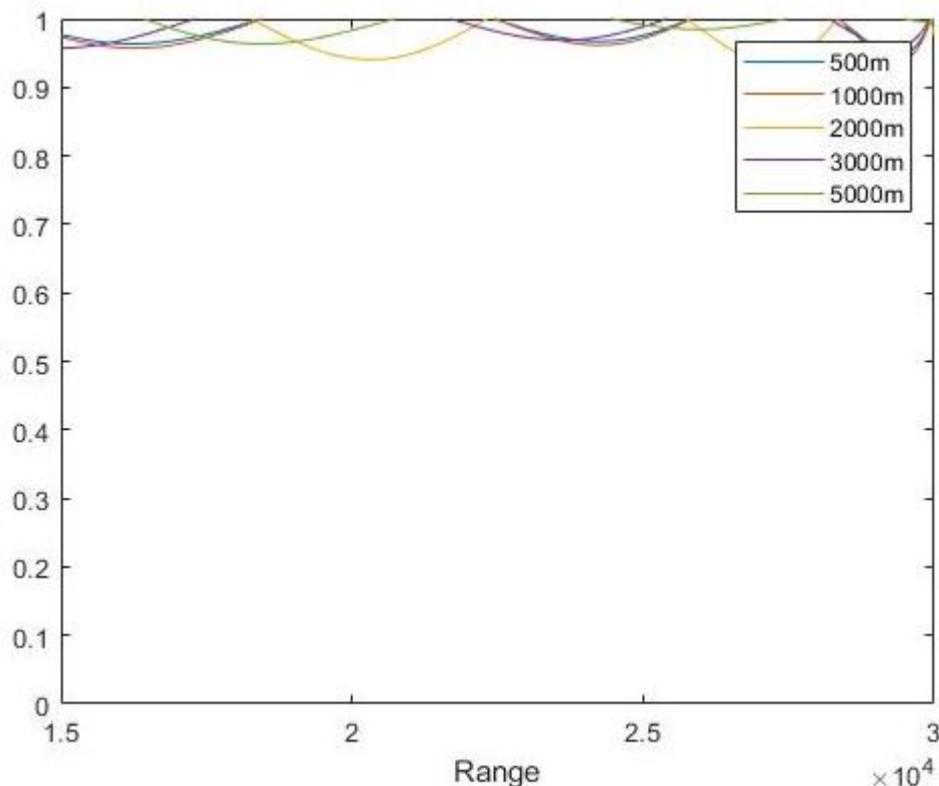


Ilustración 5-7 Efecto de la altura sobre la probabilidad de detección.

Como se puede observar en la figura 5.7, la altura no es un factor que influye sobre la

RESULTADOS DE LA SIMULACION

capacidad del radar, por tanto, las siguientes simulaciones se harán todas a la misma altura ya establecida anteriormente.

Ahora pasamos a comprobar el efecto de la distancia sobre la capacidad de detección.

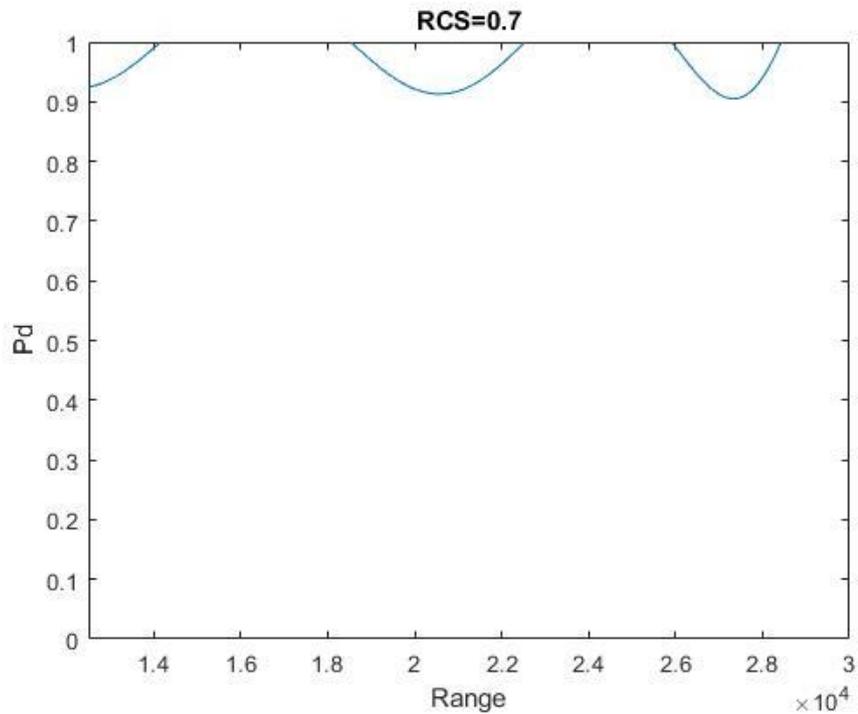


Ilustración 5-8 Efecto de la distancia sobre la probabilidad de detección.

Así pues, como podemos observar en la figura 5.8, queda demostrado que para un ratio de RCS constante la probabilidad de detección no varía con la distancia.

Lo siguiente es comprobar cómo afectan los ratios de RCS a la probabilidad de detección.

RESULTADOS DE LA SIMULACION

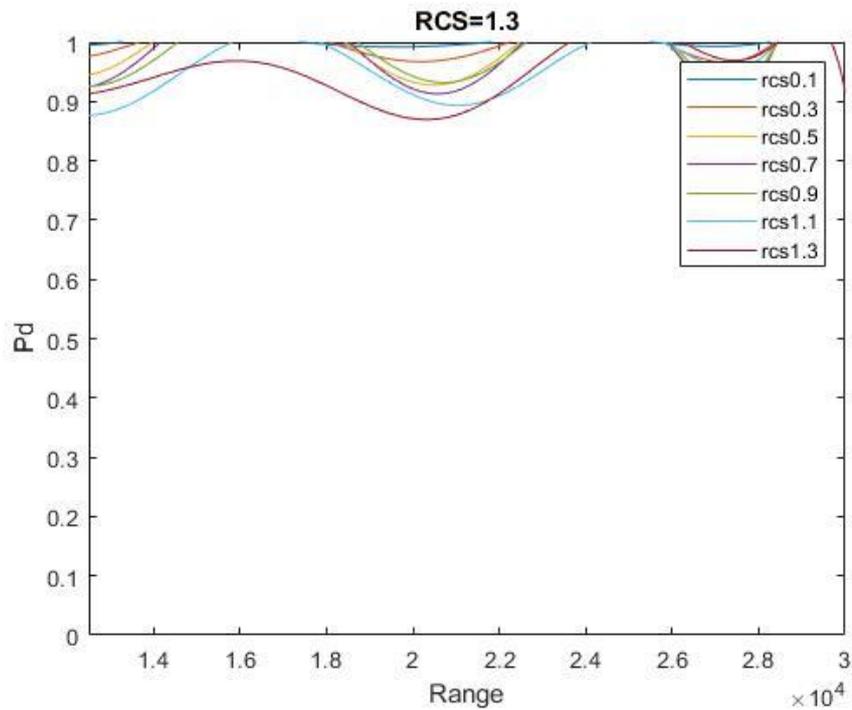


Ilustración 5-9 Efecto del ratio de RCS sobre la Probabilidad de detección.

A simple vista puede parecer que la relación entre secciones rectas radar no es determinante para la probabilidad de detección, pero esto es falso y se debe principalmente a que la única interferencia que hay no es lo suficientemente fuerte como para influir de manera determinante. En la Figura 5.10. y la Figura 5.11. comprobaremos que al añadir más interferencias las relaciones entre secciones rectas radar si son determinantes para el análisis.

RESULTADOS DE LA SIMULACION

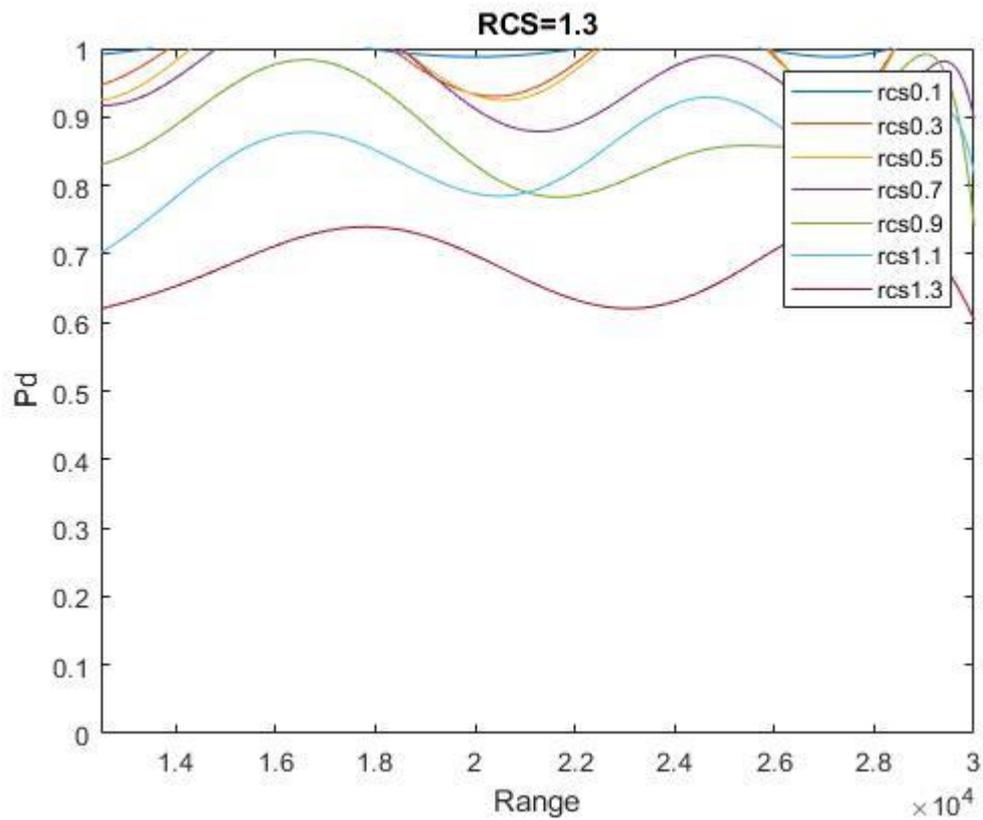


Ilustración 5-10 Efecto del ratio de RCS sobre la Probabilidad de detección con dos interferencias

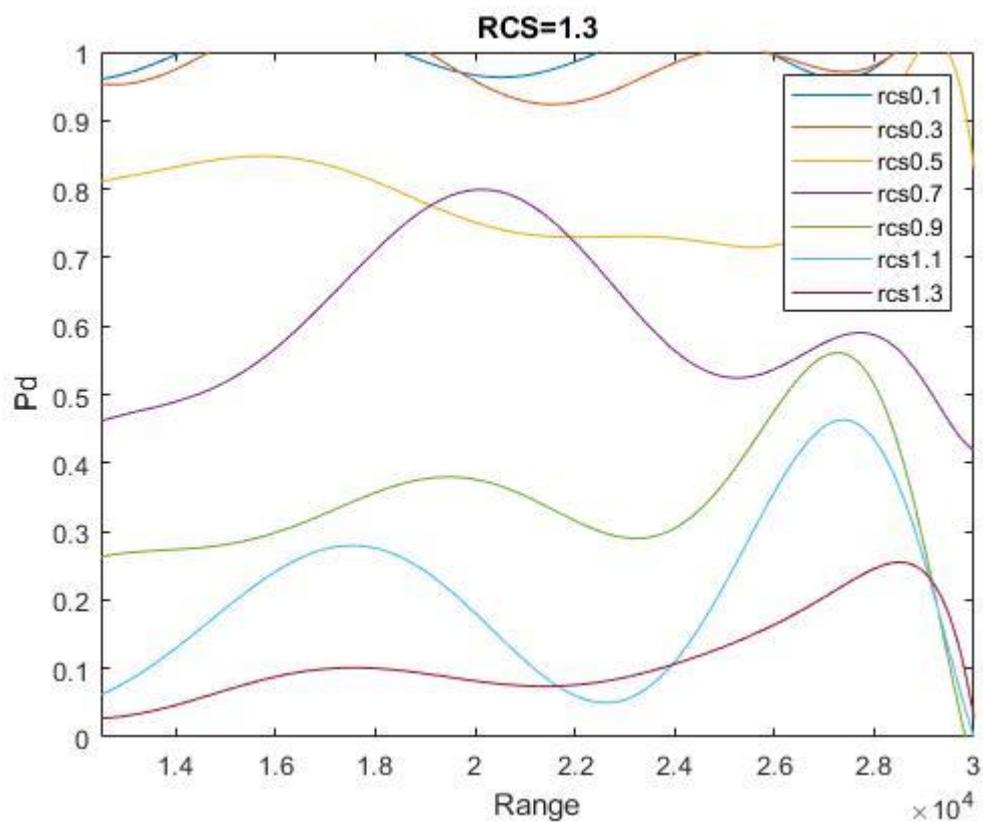


Ilustración 5-11 Efecto del ratio de RCS sobre la Probabilidad de detección con cuatro interferencias.

Como podemos observar en la figura 5.10, cuando hay dos interferencias la probabilidad

RESULTADOS DE LA SIMULACION

de detección se vuelve más sensible al ratio de secciones rectas radar, llegando incluso a bajar un 40% para el ratio más alto. Con 4 interferencias, figura 5.11, la situación se vuelve completamente insostenible, con una caída de la probabilidad de detección del 90% para el ratio más alto. Además, dados los tipos de fluctuación para el blanco y las interferencias se ve que la probabilidad de detección es variable, pero con una media bien definida e independiente de la distancia a la que se encuentra. Para ver este efecto de manera más clara tenemos la figura 5.12.

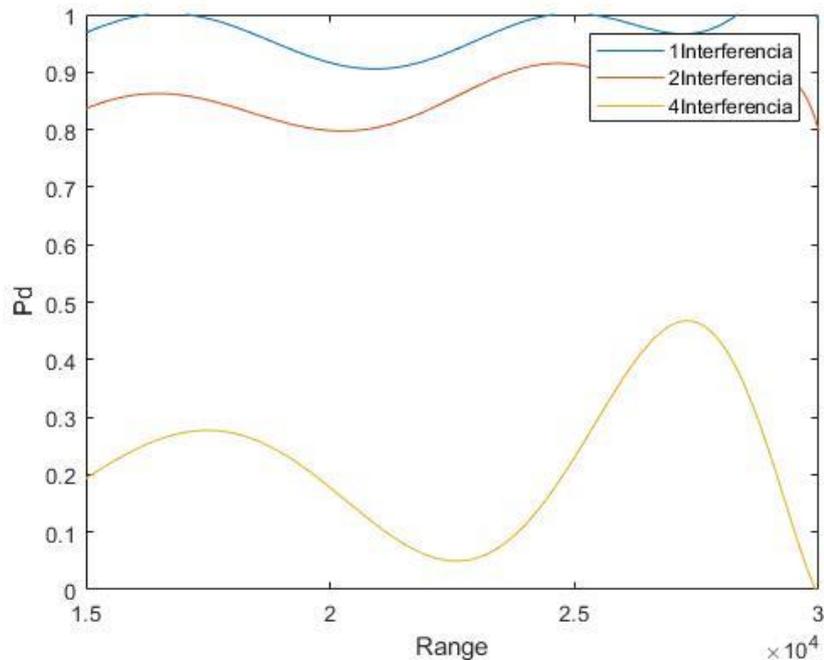


Ilustración 5-12 Efecto del ratio de RCS=1.1 sobre la Probabilidad de detección en función de las interferencias.

En la figura 5.12 queda patente el efecto de las interferencias para un mismo ratio de RCS, donde al pasar a 4 interferencias, la probabilidad de detección puede llegar a caer hasta un 80% de media.

Por último, queda evaluar cómo se comporta la probabilidad de falso blanco. Las figuras 5.13 y 5.14 muestran cómo evoluciona la probabilidad de falso blanco con dos interferencias.

RESULTADOS DE LA SIMULACION

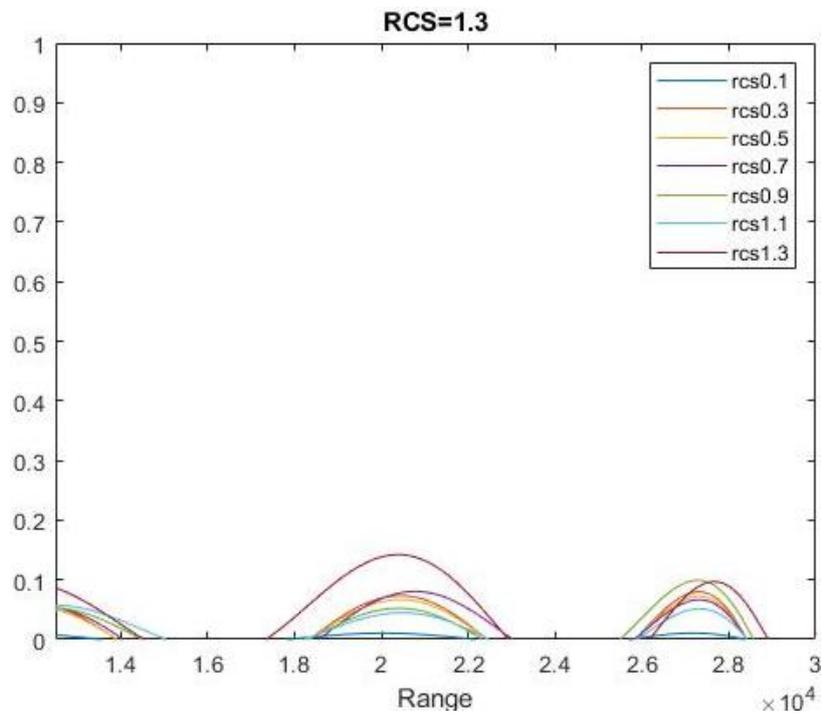


Ilustración 5-13 Probabilidad de falso blanco en función de la distancia.

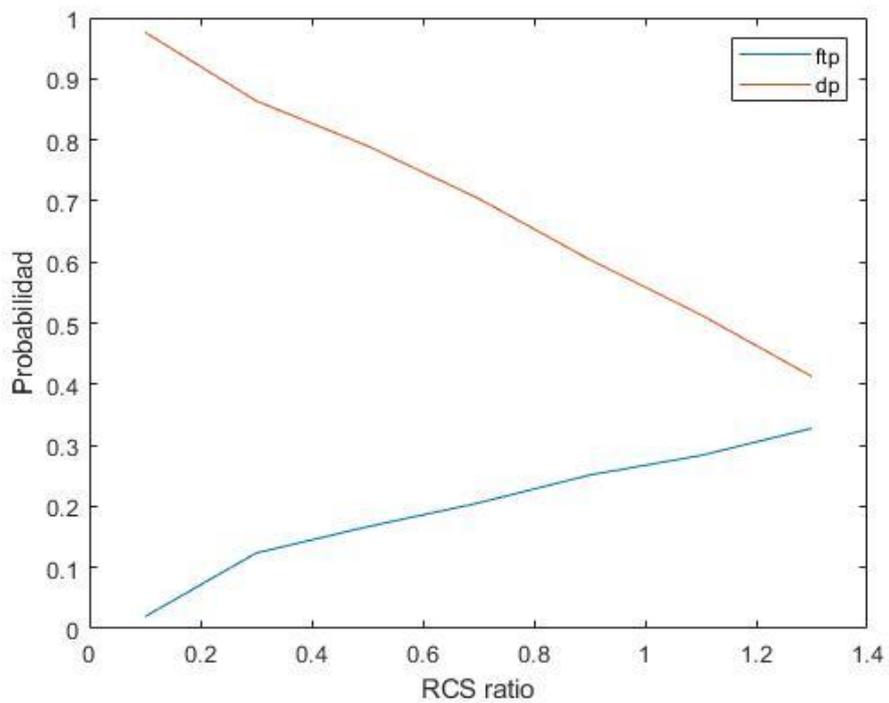


Ilustración 5-14 Probabilidad de falso blanco frente a probabilidad de detección.

Como se podía esperar, la probabilidad de falso blanco tampoco depende de la distancia a la que se evalúa la señal, solo depende del ratio de RCS y las interferencias que se encuentren durante la simulación.

6. CONCLUSIONES Y POSIBLES MITIGACIONES

Los resultados de las simulaciones confirman los siguientes resultados.

- **La degradación de la capacidad del radar primario por interferencia de los aerogeneradores se produce independientemente a cualquier distancia y altura.**
- **La intensidad de la degradación aumenta con el número de interferencias que abarquen el algoritmo CFAR.**
- **La intensidad de la degradación también es completamente dependiente del ratio RCS entre la interferencia y la aeronave.**

Para evitar o paliar estas degradaciones se pueden recomendar las siguientes opciones.

- Radars 3D.
- Radars Complementarios.
- Análisis de firmas y procesamiento radar.
- Restricciones en la ubicación de los aerogeneradores.
- Soluciones constructivas para suprimir la firma radar de los aerogeneradores.
- Degradaciones operativas

La mayoría de estas opciones suponen algún tipo de mejora en el radar, ya sea comprando mejores equipos o actualizando el software de los actuales, donde estas últimas suponen el menor impacto económico y operacional. También tenemos alternativas que afectan a los aerogeneradores, ya sea las basadas en restricciones de ubicación o las que intentan suprimir el *clutter* que producen estos (materiales que no reflejen la energía radiada por el radar). Finalmente tenemos como última solución, y también la menos deseable, permitir una cierta degradación operativa siempre que esta no se produzca en zonas críticas.

6.1 Radars 3D

Los radares primarios tradicionales de ATC son radares en dos dimensiones, ya que el haz cubre todo el rango de elevaciones. Por esto, no pueden distinguir dos blancos situados a la misma distancia oblicua pero diferente altura y es el radar secundario SSR el que se encarga de proporcionar la altura de los blancos, ya sea en modo "C" o "S".

No obstante, existen tipos de radares primarios que pueden proporcionar información en 3D mediante el uso de múltiples haces a dos o más ángulos de elevación lo que permite derivar la elevación del blanco al medir la fuerza de los retornos de cada haz.

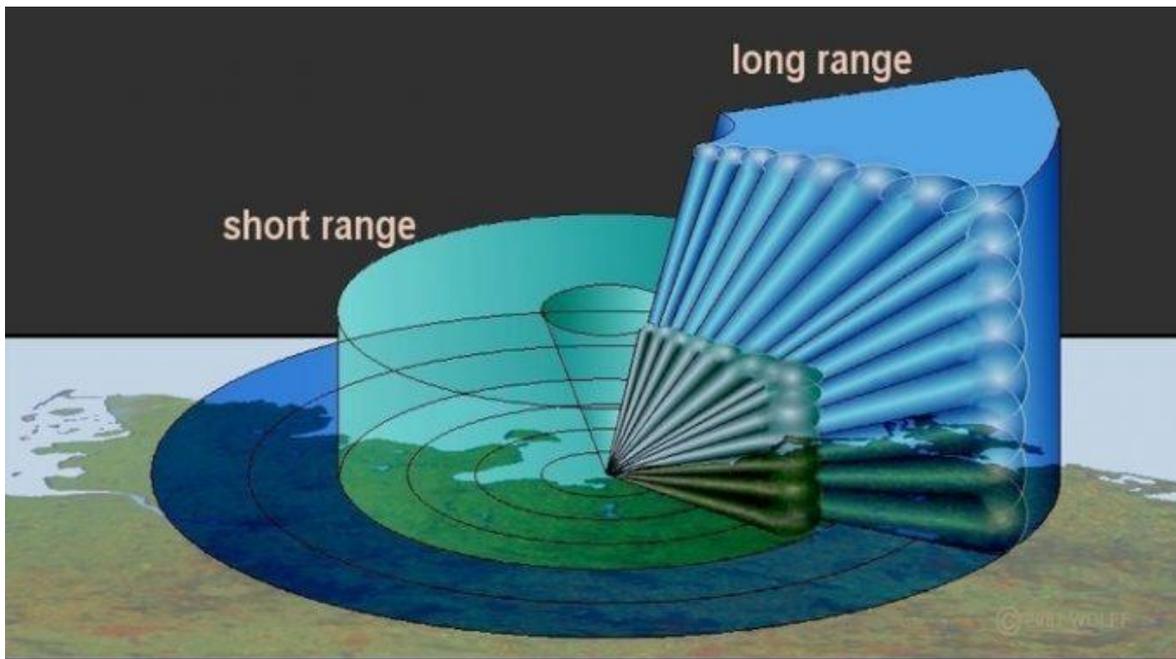


Ilustración 6-1 Radar 3D

6.2 Radares complementarios (*in-fill radars*)

Los radares complementarios son una forma frecuente de mitigación por parte de muchos proveedores de servicios en las que los aerogeneradores provocan afecciones en zonas operacionalmente críticas. Diversos fabricantes han desarrollado soluciones de este tipo de radares específicamente diseñadas para la mitigación de parques eólicos en radares ATC. La solución implica combinar los datos de los blancos del radar principal con los de un radar complementario que no tenga línea de visión sobre el parque eólico. De este modo, la consola del controlador no sufrirá las afecciones descritas y se puede generar una imagen completa de la situación combinando los dos resultados. Los radares complementarios implican utilizar soluciones de radar 2D o 3D.

La ventaja de esta solución es que puede eliminar todo el *clutter* que provoca el parque eólico. El inconveniente es el alto costo de compra, operación y mantenimiento de un radar adicional. Además, puede estar sujeto a limitaciones de disponibilidad de espectro.

6.3 Análisis de firmas y procesamiento radar

Una firma de radar es la información de las señales de eco que caracteriza un blanco. Es como una huella digital que sirve para determinar el tipo de blanco. No solo incluye información referente a los cambios de amplitud, dependientes fundamentalmente de la sección recta del radar (RCS), sino también al espectro de las frecuencias Doppler, su modulación característica, o los armónicos de la señal del eco. Las firmas de radar se determinan empíricamente y se recopilan en bases de datos.

La discriminación de blancos mediante análisis de firmas radar se puede conseguir

CONCLUSIONES Y POSIBLES MITIGACIONES

utilizando algoritmos avanzados de procesamiento de señal. Esto permitiría distinguir entre aerogeneradores y aeronaves, suprimiendo total o parcialmente el *clutter* de los aerogeneradores de las pantallas del radar.

La discriminación de blancos puede realizarse de dos formas: actualizando y mejorando el procesamiento de señal del radar existente o mediante radares de alta PRF (*Pulse Repetition Frequency*).

La modificación del procesamiento de señal del radar sería, en principio, la solución ideal desde el punto de vista económico y operativo, ya que no requeriría más que una actualización del software del radar. Tal vez sea esta la solución más esperada en los nuevos radares. El inconveniente es la fiabilidad o eficiencia que puedan tener los diversos algoritmos.

Para posibilitar un análisis de firmas radar de forma precisa, algunas soluciones proponen radares de alta PRF (*Pulse Repetition Frequency*). Estos radares podrían mejorar la discriminación, ya que utilizan un mayor espectro de frecuencia. Entre los inconvenientes, se encuentra requerir altas potencias para cubrir un rango instrumental dado. Por ello, en vez de sustituir el radar, podrían utilizarse como radares complementarios, lo cual encarecería esta solución. También tienen el inconveniente de ensuciar el espectro de frecuencias de manera importante.

6.4 Restricciones en la ubicación de los aerogeneradores

Esta mitigación solo es aceptable dependiendo de las rutas aéreas y los procedimientos de aproximación que están establecidos en el alcance instrumental del radar ya que estas rutas están ya preestablecidas y son públicas para todos. Con esto nos referimos a que, como hemos demostrado en la simulación, la capacidad de detección del radar no depende de la distancia ni de la altura y además, la sombra que genera no es lo suficientemente grande, por lo que simplemente bastaría con colocar los parques eólicos fuera de la trayectoria de estas rutas.

6.5 Soluciones constructivas para suprimir la firma radar de los aerogeneradores

Las dos técnicas propuestas para hacer “sigilosos” los aerogeneradores, es decir, consisten en reducir su sección recta radar mediante a) el desarrollo de materiales absorbentes de la radiación del radar y b) la modificación de su geometría.

La utilización de materiales absorbentes se basa en el uso de pinturas de ferrita o capas de polímero que incorporan grafito cristalino para recubrir los aerogeneradores.

CONCLUSIONES Y POSIBLES MITIGACIONES

El desarrollo de técnicas para la reducción o supresión de la firma radar fue empleada en el desarrollo de aviones militares. El gran inconveniente es que el diseño de nuevos aerogeneradores con una sección recta radar reducida podría afectar negativamente la eficiencia de los aerogeneradores en términos de producción de electricidad y costos de construcción.

6.6 Mitigaciones que implican degradaciones operativas

El aumento de los niveles de *clutter*, de falsos blancos y de falsas pistas en la pantalla de vigilancia pueden aumentar el riesgo de que el controlador no detecte un tráfico conflictivo, una demora en que la aeronave sea identificada y atendida por un controlador, y que aumente la carga de trabajo de este. El proveedor de servicios puede decidir tolerar estas degradaciones cuando el riesgo que impliquen para la seguridad aérea no sea significativo.

Una forma de tolerar estas degradaciones es la utilización única del radar secundario SSR en algunas zonas afectadas. Esta medida tiene un costo que es perder los tráficos no colaborativos, por lo que debería restringirse donde sea obligado el uso del transpondedor.

Otra forma de mitigar los efectos de las degradaciones es aumentar el ángulo de inclinación del radar. El costo asociado es que se aumenta la altura mínima de vigilancia. Finalmente se podrían tolerar las degradaciones en algunos casos o de forma temporal, si se producen en zonas en las que no se vean afectadas rutas aéreas.

A) Presupuestos

En este apartado estudiaremos el coste aproximado que supondría replicar completamente este trabajo por parte de un ingeniero recién graduado. Este presupuesto podemos dividirlo principalmente en dos grupos: costes de la mano de obra y costes del material necesario. Además, se sumará un 5% al coste total del proyecto debido a los gastos de luz, climatización, agua, etc.

1) Gastos de personal

El personal está formado por un ingeniero trabajando a jornada completa, y por el tutor, en este caso un catedrático de universidad, que se encarga de supervisarlos.

Tabla 7 Costes derivados de la mano de obra

Mano de obra			
Empleado	Horas dedicadas	Salario neto (€/h)	Importe (€)
Ingeniero graduado	160	11	2379.52
Catedrático	25	30	750
Subtotal 1			3129.52

2) Gastos de material

Los costes para el material han de tener en cuenta la amortización para cada uno. En este apartado se incluyen tanto el software como el hardware que hemos necesitado.

Tabla 8 Gastos de materiales

Materiales				
Recurso	Coste total (€)	Periodo de amortización (meses)	Periodo de amortizado (meses)	Importe (€)
Ordenador personalizado por piezas	750	72	10	104.16
Licencia Windows 10	100	120	10	8.33
Licencia Microsoft Office	160	12	3	40
Licencia Matlab	800	12	3	200
Subtotal 2				352.49

3) Coste total de la ejecución del proyecto

En esta sección se añadirán los gastos indirectos, beneficios e impuestos para obtener el coste total de proyecto.

Tabla 9 Coste total del proyecto

Concepto	Importe (€)
Subtotal 1	3129.52
Subtotal 2	352.49
Costes indirectos	174.10
Total sin IVA	3656.11
IVA	767.783
TOTAL	4423.893

Bibliografía

1. *R. Weber J. Schanne*. "Airport Surveillance Radar Model 11 (ASR-11) FAA Test and Evaluation Master Plan (TEMP)". Federal Aviation Administration DOT/FAA/CT-TN97/27. February 1998.
2. *EUROCONTROL*. "Standard Document for Radar Surveillance in en-Route Airspace and Major Terminal Areas". SUR.ET1.ST01.1000-STD-01- 01. March 1997.
3. *EUROCONTROL*. "EAS Generic Document (EGD)". ISS.1.ID-EGD.SUR.PSR.
4. *OACI*. "European Guidance Material on Managing Building Restricted Areas". ICAO EUR DOC 015. 3rd Edition. November 2015.
5. *EUROCONTROL* Guidelines "How to Assess the Potential Impact of Wind Turbines Surveillance Sensors". Ed. 1.2 . ISBN number: 978-2-87497-043-6. Reference nr: EUROCONTROL-GUID-130. September 2014.
6. *CAA Civil Aviation Authority*. "Safety and Airspace Regulation Group. CAP 764 CAA Policy and Guidelines on Wind Turbines". Sixth Edition February 2016.
7. *European Organisation for the Safety of Air Navigation*. "Wind farm impact assessment techniques and mitigation measures". May 2007.
8. *European Organisation for the Safety of Air Navigation*. "Assessment methodology to determine the impact of wind turbines on ATC surveillance systems". May 2007.
9. *B. R. Mahafza*. Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB. 3rd edition. CRC Press. Taylor & Francis group. 2013.
10. *D. Jenn, C. Ton*. "Wind Turbine Radar Cross Section". International Journal of Antennas and Propagation Volume 2012, Article ID 252689. Hindawi Publishing Corporation doi: 10.1155/2012/252689
11. *L. R. Danoon, A. K. Brown*. "Modeling Methodology for Computing the Radar Cross Section and Doppler Signature of Wind Farms". IEEE Antennas Propagation Magazine, Vol. 61, No. 10, Oct. 2013.
12. *Ministry of Defence London, UK*. Defence Technology Strategy for the Demands of the 21st Century "The Effects of Wind Turbine Farms on ATC Radar". AWC/WAD/72/665/ TRIALS. 2005.

Bibliografía

13. *A. Buterbaugh, B.M. Kent, K.C. Hill, G. Zelinski*. "Dynamic Radar Cross Section and Radar Doppler Measurements of Commercial General Electric Windmill Power Turbines - Part 2 – Predicted and Measured Doppler Signatures". 29 Annual Symposium of the Antenna Measurement Techniques Association. AMTA 2007.
14. *B.M. Kent, A. Buterbaugh, K.C. Hill, G. Zelinski, R. Hawley, L. Cravens, T. Van, C. Vogel, T. Coveyou*. "Dynamic radar cross section and radar Doppler measurements of commercial general electric windmill power turbines - Part 1—Predicted and measured radar signatures". IEEE Antennas Propagation Magazine, vol. 50, no. 2, pp. 211-219, Apr. 2008.
15. *M.I. Skolnik*. "Radar Handbook". Third Edition. McGraw-Hill Education, 2008.
16. *A.D. Whalen*. "Detection of Signals in Noise". Editors: Henry G. Booker Nicholas DeClaris eBook ISBN: 9781483220543 Imprint: Academic Press.
17. *P. Swerling*. "Probability of Detection for Fluctuating Targets". ASTIA Document Number AD 80638. March 17, 1954.