



**Centro Universitario de la Defensa  
en la Escuela Naval Militar**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

*Diseño e implementación de un entrenador radar básico  
en Matlab, para radares pulsados*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**ALUMNO:** Santiago De León De León

**DIRECTORES:** Paula Gómez Pérez

**CURSO ACADÉMICO:** 2014-2015

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño e implementación de un entrenador radar básico  
en Matlab, para radares pulsados*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General / Infantería de Marina

Universida<sub>de</sub>Vigo



# RESUMEN

El presente trabajo nació de la idea de desarrollar una interfaz de usuario en MATLAB para el manejo y entrenamiento del alumno en la comprensión y utilización de un radar de pulsos.

Con él, se pretende:

- Que sirva como herramienta para complementar la formación del alumno en cuestiones de teoría radar de una manera práctica.
- Mostrar de una manera gráfica las principales características y parámetros de un radar de pulsos.
- Que la interacción entre el alumno y la consola afiance los conocimientos en sistemas radar de un usuario novel.

Para ello, se ha tenido en cuenta que el usuario que se enfrenta a esta aplicación comienza su andadura en el conocimiento de los sistemas radáricos y por tanto, la interfaz empleada trata de una manera fácilmente deducible los principales parámetros radar.

A la vista de los inputs anteriores, se ha optado por un diseño que incorpora dos pantallas tipo alfa, una sección de ajustes de parámetros del transmisor y del receptor y una sección de cálculos y observaciones.

## PALABRAS CLAVE

Principios radar, ecuación radar, RCS, integración de pulsos, interfaz gráfica.



## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia, por haberme apoyado durante todos estos años, entendiendo mis ausencias y mis compromisos con la Armada.

A mi tutora, Paula Gómez Pérez, por su dedicación durante todo el proyecto y su enorme paciencia.



## Contenido

Contenido .....	1
Índice de Figuras .....	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos .....	7
1.1 Introducción .....	7
1.2 Objetivos .....	8
2 Fundamentos de Radar .....	11
2.1 Conceptos básicos de radar .....	11
2.1.1 Ecuación radar básica .....	11
2.1.2 Firma radar o RCS .....	14
2.2 Radares de Onda Pulsada.....	16
2.2.1 Particularidades de los radares pulsados.....	17
2.2.2 Distancia máxima no ambigua.....	19
2.2.2 Resolución en distancia .....	22
2.2.4 Integración de pulsos .....	23
2.2.4.1 Integración coherente.....	24
2.2.4.2 Integración no coherente.....	25
2.2.5 Radares monoestáticos y radares biestáticos .....	25
2.2.6 Pantallas en consolas radar .....	27
3 Aplicación Desarrollada .....	29
3.1 Introducción .....	29
3.2 Manual del Usuario.....	30
3.2.1 Interfaz de usuario .....	30
3.2.2 Introducción de los datos del Transmisor.....	32
3.2.3 Introducción de los datos del Receptor.....	33
3.2.4 Introducción de los datos del blanco .....	35
3.2.6 Cálculo de la posición del blanco y estimación de su RCS .....	35
4 Resultados .....	37
4.1 Introducción .....	37
4.2 Detección de blancos simples .....	37
4.3 Detección de blancos ambiguos .....	39
4.4 Discriminación de blancos en distancia.....	40
4.5 Integración de pulsos .....	41

4.6 Impacto del ruido en la probabilidad de detección .....	42
4.7 Notificaciones al operador .....	42
5 Conclusiones y líneas futuras .....	45
5.1 Conclusiones .....	45
5.2 Líneas futuras .....	45
6 Bibliografía.....	47
Anexo I: Tipos de Datos Utilizados .....	49

## Índice de Figuras

Figura 2-1 Experimento que demuestra la dependencia RCS con respecto a la frecuencia. [2].....	15
Figura 2-2 Dependencia de la RCS respecto a la frecuencia, espacio entre dispersiones 0.1 m[2]	16
Figura 2-3 Dependencia de la RCS respecto a la frecuencia, espacio entre dispersiones 0.7 m[2]	16
Figura 2-4 Diagrama de bloques de un radar pulsado[2] .....	19
Figura 2-5 Distancia máxima no ambigua. [2].....	20
Figura 2-6 Diagrama de bloques simplificado de un radar de pulsos. [2].....	21
Figura 2-7 Tren de pulsos transmitidos y recibidos. [2].....	21
Figura 2-8 Discriminación de blancos en distancia y orientación. [2].....	22
Figura 2-9 (a) Dos blancos no discernibles. (b) Dos blancos discernibles. [2] .....	23
Figura 3-1 Vista general consola GUI.....	30
Figura 3-2 Pantalla Alfa superior. ....	30
Figura 3-3 Pantalla Alfa inferior. ....	31
Figura 3-4 Sección parámetros radar.....	31
Figura 3-5 Sección para introducción de blancos. ....	31
Figura 3-6 Sección de cálculos y obsevaciones. ....	32
Figura 3-7 Parámetros del transmisor. ....	33
Figura 3-8 Probabilidad de detección usando un solo pulso SNR, para varios valores de Pfa. [2] .	34
Figura 3-9 Parámetros del receptor. ....	34
Figura 3-10 Datos de los blancos. ....	35
Figura 3-11 Posición del blanco y estimación de su RCS.....	36
Figura 4-1 Blanco sin ambigüedades cumpliendo distancias.....	37
Figura 4-2 Dos blancos sin ambigüedades cumpliendo distancias con ruido. ....	38
Figura 4-3 Primer blanco detectado, segundo por debajo del umbral de detección.....	39
Figura 4-4 Primer blanco con ambigüedad en distancia y segundo sin ella.....	40
Figura 4-5 Diferenciación entre blancos contiguos.....	40
Figura 4-6 Blancos solapados en distancia.....	41
Figura 4-7 Detección sin integración. ....	41
Figura 4-8 Integración de varios pulsos. ....	42
Figura 4-9 Impacto del ruido sobre la probabilidad de detección.....	42
Figura 4-10 Notificaciones al operador.....	43



## Índice de Tablas

Tabla 2-1 Ambigüedades con la PRF[2] .....	18
Tabla 0-1 Parámetros para el usuario y programador. ....	49



# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Introducción

El término RADAR deriva del acrónimo anglosajón “*Radio Detection And Ranging*”, es decir, detección de objetos y medición de distancias mediante ondas de radiofrecuencia. Es un sistema que utiliza el espectro electromagnético para la medición de distancias, altitudes, direcciones y velocidades de blancos tanto móviles como estáticos. Su funcionamiento se basa en la emisión de ondas electromagnéticas que, al reflejarse en algún objeto, son recogidas después del rebote y analizadas en el entorno del receptor radar.

Entre los principales científicos cuyas aportaciones a la ciencia han posibilitado el desarrollo de los sistemas radar, podemos destacar a James Clerk Maxwell que, en 1864, describe las leyes del electromagnetismo, Heinrich Rudolf Hertz que, en 1888, demuestra la reflexión de las ondas electromagnéticas en superficies metálicas, Guillermo Marconi, en 1898, con las transmisiones sin hilos y Nikola Tesla, en 1917, con los principios del radar y el estudio del magnetrón.

En cuanto a la herramienta de software que utilizaremos, será MATLAB “*laboratorio de matrices*”, que, en su origen, fue diseñado por el matemático y programador americano especialista en análisis numérico Cleve Barry Moler en el año 1984. Utiliza un lenguaje de programación propio “lenguaje M” y que fue creado en 1970 para proporcionar mayor sencillez al software de matrices sin tener que usar Fortran. MATLAB permite, entre otras utilidades, el manejo de matrices, representar tanto datos como funciones, el desarrollo de interfaces de usuario (conocidas como GUI, *Guided User Interface*) y la comunicación con otros lenguajes de programación y dispositivos software.

La exposición en [4] señala en los orígenes de la GUI, a los investigadores del Stanford Research Institute liderados por Douglas Engelbart (Universidad de Berkeley), que desarrollaron en 1973 el Xerox Alto, el primer ordenador personal con una interfaz de hipervínculos en modo texto gobernado por un mouse, que también inventaron (el primer prototipo en madera).

Este concepto fue ampliado y trasladado al entorno gráfico por los investigadores del Xerox PARC (Palo Alto Research Center), en él se definieron los conceptos de ventanas, checkbox, botones de radio, menús y puntero del mouse. Fue implementado comercialmente en el Xerox Star 8010 en 1981

Hoy en día, tenemos como ejemplo de GUIs:

Los entornos de escritorio de los sistemas operativos: Windows, Mac Os, X – Windows (Linux), etc.

Los entornos que usan sistemas operativos de tiempo real: cajeros automáticos, procesos industriales, teléfonos móviles, etc.

Actualmente, los sistemas radar son de vital importancia para cualquier sistema de vigilancia y seguimiento, sin importar el tipo de emplazamiento. No solo son utilizados en el ámbito militar, sino también en multitud de aplicaciones de la vida civil, para vigilancia aérea, monitorización meteorológica, etc. [10]

En las Fuerzas Armadas, el conocimiento y manejo de los sistemas radar es de vital importancia. Los radares navales se utilizan para gran cantidad de aplicaciones, como radares de navegación, de exploración tanto aéreos como de superficie, direcciones de tiro, iluminadores, etc.

Es por tanto fundamental, que se conozcan a la perfección sus parámetros de funcionamiento y cómo le afectan unos buenos ajustes tanto a la hora de la detección de blancos, como a la hora de explotar al máximo sus capacidades.

La aplicación desarrollada en este trabajo fin de grado (en adelante TFG), pretende que el usuario/alumno sea capaz de entender de una forma sencilla y visual el funcionamiento básico de un radar pulsado. A largo plazo, el objetivo es que el usuario, mediante esta herramienta docente, pueda comprobar cómo afectan a la detección de blancos parámetros como la potencia transmitida, la PRI, la RCS o las técnicas de integración de pulsos.

Este trabajo sienta las bases fundamentales de dicha aplicación, estableciendo el núcleo de la misma, para un radar de onda pulsada. Desde la generación básica de las señales transmitidas, hasta las técnicas básicas de procesado de la señal, como pueden ser la integración de pulsos.

La herramienta que se ha seleccionado para el desarrollo de la aplicación es MATLAB, debido a su sencillez de programación y gran versatilidad. Se ha diseñado una interfaz gráfica o GUI (Guided User Interface) con la idea de acercar esta herramienta a todos aquellos noveles en la programación en este entorno y que mejora la intuición del alumno.

La presente memoria recoge todo el trabajo llevado a cabo, estructurado de la siguiente manera: En el Capítulo 2 se da un repaso en profundidad a los principios básicos de la teoría radar, con el fin de entender qué es cada uno de los parámetros que se van a desarrollar durante la aplicación. Le sigue el Capítulo 3, que proporciona el manual de usuario de la aplicación, en el cual se especifican los márgenes de trabajo de cada una de las variables implicadas. El Capítulo 4 expone una serie de ejemplos que muestran de lo que es capaz la aplicación, y que sirven de guía para que el usuario que se enfrenta por primera vez a la consola sepa interpretar los resultados obtenidos en pantalla.

Por último, en el Capítulo 5 se detallan las conclusiones obtenidas en este trabajo, así como una serie de líneas futuras que permitan la continuidad del mismo.

## 1.2 Objetivos

El trabajo presentado consistirá en la generación de la interfaz gráfica de un radar de onda pulsada, es decir, en la creación de una consola radar, en la que el alumno tenga la posibilidad de modificar los diferentes parámetros de funcionamiento de un radar pulsado, mediante la herramienta de software matemático MATLAB.

MATLAB permite la creación de espacios gráficos y es por ello que con este trabajo se pretende que un alumno/usuario que comience a adentrarse en los conocimientos del radar, sea capaz de mediante la introducción de diferentes valores en los parámetros del transmisor y receptor llegar a una mejor comprensión de la teoría y el funcionamiento de una radar de pulsos.

La principal idea es generar en el usuario la necesidad de querer saber más y de adquirir conocimientos a base de ir practicando con el simulador, ya que dependiendo de cómo sean sus ajustes será capaz de adquirir un blanco o no.

La presente memoria realiza un recorrido por los principales principios de la teoría radar. Continúa con un manual de funcionamiento para el operador con la idea de que cualquier persona sin necesidad de conocimientos de radar, sea capaz de utilizar el mismo. A tales efectos, se presentan en el capítulo final una serie de ejemplos de manejo del sistema, con el fin docente de entrenar al usuario final en el manejo de la herramienta y en la interpretación de los resultados. Finaliza con unas conclusiones y líneas futuras en donde se expone cuál puede ser el futuro desarrollo de este software y algunas ideas sobre lo que se podría llegar a conseguir.



## 2 FUNDAMENTOS DE RADAR

### 2.1 Conceptos básicos de radar

#### 2.1.1 Ecuación radar básica

La ecuación radar es la base fundamental de la teoría radar. Permite obtener la distancia a la que se encuentra un blanco, mediante la relación entre la potencia transmitida y la potencia recibida, tal y como se describe en la Ec. 1:

$$R_{max} = \left( \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot S_{min}} \right)^{1/4} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

P<sub>t</sub>: Potencia transmitida (W)

G: Ganancia (dBi)

λ: Longitud de onda (m)

σ: RCS (m<sup>2</sup>)

S<sub>min</sub>: Mínima señal discernible (W)

Considerando un radar con una antena omnidireccional (aquella que puede radiar una misma cantidad de energía en todas direcciones y, por tanto, con un patrón de radiación esférica). Se puede definir la densidad de potencia (potencia entre unidad de área) en cualquier punto del espacio como:

$$P_D = \frac{\text{Potencia de pico transmitida}}{\text{area de la esfera}} = \frac{\text{wattios}}{m^2} \quad (\text{Ec. 2})$$

La densidad de potencia a una distancia R del radar, (asumiendo una propagación media sin pérdidas) vendrá, por tanto, dada por la Ec. 3:

$$P_D = \frac{P_t}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde  $P_t$  es la potencia de pico transmitida y  $4\pi R^2$  es la superficie de una esfera de radio  $R$ .

Sin embargo, los sistemas radar utilizan antenas direccionales para incrementar la densidad de potencia en una cierta dirección. Las antenas direccionales están generalmente caracterizadas por su ganancia  $G$  y por la apertura de antena efectiva  $A_e$ , que están relacionadas entre sí mediante la Ec. 4:

$$A_e = \frac{G \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda, que a su vez es igual  $\lambda = c / f_0$ , siendo  $c$  la velocidad de la luz en el vacío ( $3 \cdot 10^8 \text{ m}^2$ ) y  $f_0$  es la frecuencia portadora con que trabaja el transmisor.

La relación entre la apertura efectiva de la antena  $A_e$  y la apertura física de la antena,  $A$ , viene dada por la expresión:

$$\begin{aligned} A_e &= \rho \cdot A \\ 0 &\leq \rho \leq 1 \end{aligned} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde  $\rho$  se refiere a la eficiencia de apertura, siendo un valor cercano a 1 en las antenas utilizadas en sistemas radar complejos. En el desarrollo de este TFG se asumirá que  $A$  y  $A_e$  son iguales, y en la práctica,  $\rho=0.7$  es ampliamente aceptado. También se asumirá, por simplicidad, que las ganancias de la antena en los modos de transmisión y recepción son las mismas, porque se trabajará bajo la premisa de radares monoestáticos (misma antena en transmisión que en recepción).

Teniendo en cuenta la relación anterior y la ecuación de la densidad de potencia, podemos reescribir esta última a una distancia  $R$  del radar y utilizando una antena de ganancia  $G$  mediante la Ec. 6:

$$P_D = \frac{P_t \cdot G}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (\text{Ec. 6})$$

Cuando la energía radiada por un radar incide en un blanco, las corrientes superficiales inducidas en ese objetivo, irradian energía electromagnética en todas direcciones. La cantidad de energía reirradiada es proporcional al tamaño del blanco, orientación, forma, y material, los cuales se agrupan en un parámetro específico del blanco denominado *Superficie Equivalente Radar* o en inglés *Radar Cross Section* (RCS), representado comúnmente por  $\sigma$  [13].

La RCS se define como la relación entre la energía reflejada y devuelta al radar y la densidad de energía incidente en el blanco.

$$\sigma = \frac{P_r}{P_D} \text{ m}^2 \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde  $P_r$  es la energía reflejada por el blanco.

La energía total enviada al procesador de señal radar por la antena es:

$$P_{Dr} = \frac{P_t \cdot G \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi \cdot R^2)^2} \cdot A_e \quad (\text{Ec. 8})$$

Sustituyendo el valor de  $A_e$  de la ecuación (Ec. 4) en la ecuación (Ec. 8), tenemos:

$$P_{Dr} = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot R^4} \quad (\text{Ec. 9})$$

Por tanto, sabiendo que la  $S_{min}$  representa la mínima potencia de señal detectable en el receptor, podemos calcular la máxima distancia a la que el radar es capaz de detectar un blanco concreto,  $R_{max}$ , que viene dada, a su vez, por la ecuación Ec.1, siendo esta la forma básica de la Ecuación Radar [2]:

$$R_{max} = \left( \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot S_{min}} \right)^{1/4} \quad (\text{Ec. 1})$$

La Ec. 1 nos sugiere que para doblar la máxima distancia radar, se debe incrementar la potencia de pico transmitida  $P_t$ , dieciseis veces; o de forma equivalente incrementar la apertura efectiva  $A_e$  cuatro veces.

En la práctica, la señal reflejada que llega de vuelta al radar viene acompañada de ruido, que introduce niveles indeseados de potencia en todas las frecuencias del sistema. El ruido es de naturaleza aleatorio y se puede describir por la función de Densidad de Potencia Espectral (PSD). La potencia de ruido,  $N$ , se define en función del ancho de banda en el que opera el radar, como muestra la Ec. 10:

$$N = \text{Ruido PSD} \cdot B \quad (\text{Ec. 10})$$

La potencia de ruido de entrada a una antena sin pérdidas viene a su vez dada por la Ec. 11:

$$N_i = K \cdot T_e \cdot B \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ , es la constante de Boltzman,

$T_e$  es la temperatura efectiva de ruido en grados Kelvin.

$B$  es el ancho de banda en hertzios (Hz).

Es siempre deseable que la mínima señal detectable ( $S_{min}$ ) sea mayor que la potencia de ruido. La fiabilidad de un receptor radar está normalmente reflejada por su figura de mérito, llamada figura de ruido  $F$ . La figura de ruido se define como:

$$F = \frac{(SNR)_i}{(SNR)_o} = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} \quad (\text{Ec. 12})$$

$(SNR)_i$  y  $(SNR)_o$  son respectivamente los ratios de Señal Ruido, a la entrada y salida del receptor.  $S_i$  es la potencia de la señal de entrada,  $N_i$  es la potencia de ruido a la entrada,  $S_o$  y  $N_o$ , son respectivamente, las salidas de potencia de señal y de ruido. Substituyendo en las ecuaciones (Ec. 11) y (Ec. 12) y despejando términos, tenemos que:

$$S_i = K \cdot T_e \cdot B \cdot F \cdot (SNR)_o \quad (\text{Ec. 13})$$

Dado lo cual, la mínima potencia de señal detectable se puede expresar como:

$$S_{min} = K \cdot T_e \cdot B \cdot F \cdot (SNR)_{o_{min}} \quad (\text{Ec. 14})$$

El umbral de detección radar es establecido como la mínima salida  $SNR$ ,  $(SNR)_{o_{min}}$ . Substituyendo en las ecuaciones (Ec. 14) y (Ec. 1) nos da:

$$R_{max} = \left( \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot K \cdot T_e \cdot B \cdot F \cdot (SNR)_{o_{min}}} \right)^{1/4} \quad (\text{Ec. 15})$$

O de forma equivalente,

$$(SNR)_o = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot K \cdot T_e \cdot B \cdot F \cdot R^4} \quad (\text{Ec. 16})$$

Las pérdidas en el radar, representadas como  $L$  reducen el total de la SNR, y por lo tanto:

$$(SNR)_o = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot K \cdot T_e \cdot B \cdot F \cdot L \cdot R^4} \quad (\text{Ec. 17})$$

Aunque se puede expresar en multitud de formas diferentes, la ecuación (Ec. 17) es la que generalmente se conoce como ecuación radar.

### 2.1.2 Firma radar o RCS

La superficie equivalente radar describe la cantidad de potencia reirradiada por el blanco hacia el radar, cuando el blanco es iluminado con una fuente de energía en radiofrecuencia (RF) [2] [7]. Aunque a veces la RCS se tome como una constante específica del blanco, en la práctica, no es lo común. La RCS de un blanco es un elemento que fluctúa dependiendo del ángulo presentado al radar, así como de la frecuencia y la polarización de la onda incidente.

Las ondas electromagnéticas, con alguna polarización específica, son habitualmente difractadas o dispersadas en todas direcciones cuando inciden sobre un blanco. Estas ondas dispersadas son separadas en dos partes. La primera la conforman las ondas que tienen la misma polarización que la antena receptora. La otra parte de las ondas dispersadas tiene diferente polarización, por lo que la antena receptora no será capaz de captarlas (al menos, no en su totalidad). La intensidad de la energía reflejada en el blanco que tiene la misma polarización que la antena receptora del radar es usada para definir la RCS del blanco [8]. Cuando un blanco es iluminado con energía de radiofrecuencia, este actúa como una antena, por lo que generará radiación en campo cercano (patrón de campo que está cerca de la antena), en las áreas próximas al blanco, y campo lejano (patrón de campo que está a gran distancia de la antena), a distancias alejadas del mismo. Para los sistemas radar, operando comúnmente en la banda de los GHz, y con blancos a distancias de millas náuticas, podemos suponer que el radar se encuentra en distancias de campo lejano del blanco, y, por lo tanto, el frente de ondas emitido por el blanco se puede modelar como una combinación lineal de ondas planas.

Si asumimos que la densidad de potencia de una onda incidente sobre un blanco localizado a una distancia  $R$  del radar es  $P_{Di}$  la cantidad de potencia reflejada desde el blanco es:

$$P_r = \sigma \cdot P_{Di} \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde  $\sigma$  es la RCS del blanco.

$P_{Dr}$  Se define como la cantidad de potencia de las ondas dispersadas hacia la antena receptora. Por consiguiente se tiene que:

$$P_{Dr} = \frac{P_r}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (\text{Ec. 19})$$

Por tanto, despejando de (Ec. 18) y (Ec. 19) obtenemos:

$$\sigma = 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \left( \frac{P_{Dr}}{P_{Di}} \right) \quad (\text{Ec. 20})$$

La RCS del blanco se obtiene a partir de la contribución de todas las ondas dispersadas en dirección al radar cuya polarización es la misma que la de la antena receptora. Representa un porcentaje de total de energía dispersada por el blanco  $\sigma_t$ , donde  $\sigma_t > \sigma$ . Asumiendo un sistema de

coordenadas esférico definido por  $(\rho, \theta, \phi)$ , a una distancia  $\rho$ , la RCS dispersada por el blanco se encuentra en función de  $(\theta, \phi)$  [6]. Los ángulos  $(\theta_i, \phi_i)$  definen las direcciones de propagación de las ondas incidentes. Por otro lado, los ángulos  $(\theta_s, \phi_s)$  definen la dirección de propagación de las ondas dispersadas. En el supuesto caso de que  $\theta_s = \theta_i$  y  $\phi_s = \phi_i$ , define la RCS monoestática. La RCS medida cuando los ángulos  $\theta_s \neq \theta_i$  y  $\phi_s \neq \phi_i$  es llamada RCS biestática.

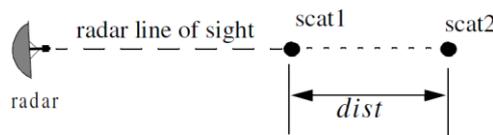
La RCS total dispersada por el blanco es dada por la expresión:

$$\sigma_t = \frac{1}{4 \cdot \pi} \int_{\varphi_s=0}^{2\pi} \int_{\theta_s=0}^{\pi} \sigma(\theta_s, \varphi_s) \sin\theta_s \, d\theta \, d\varphi_s \quad (\text{Ec. 21})$$

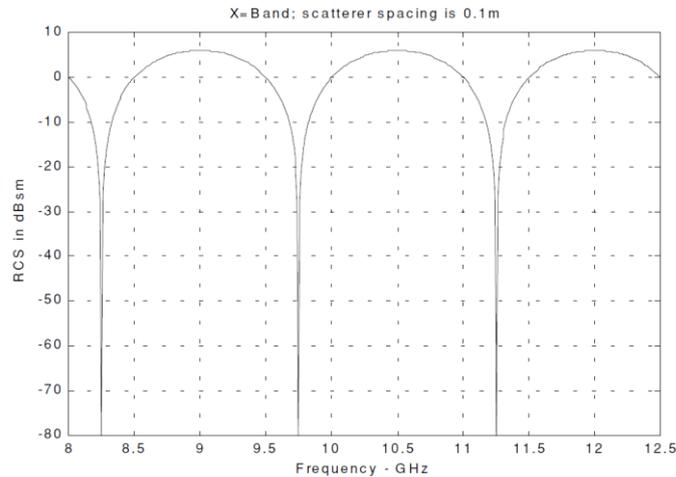
La cantidad de energía dispersada devuelta por el blanco es proporcional al porcentaje entre el tamaño del blanco y la longitud de onda de la señal incidente,  $\lambda$ . De hecho, un radar no será capaz de detectar blancos más pequeños que la longitud de onda con la que opera. Por ejemplo, si los radares meteorológicos usan frecuencias en banda L (de 1 a 2 GHz), las gotas de lluvia serán casi invisibles para el radar, puesto que son más pequeñas que su longitud de onda (que se sitúa entre los 0.3 y 0.15 m).

Las medidas de RCS que se efectúan en la región de frecuencia en la que el tamaño del blanco y de la longitud de onda son similares, son referidas como la **región de Rayleigh**. Si no, la región de frecuencia donde la extensión del blanco es mayor que la de la longitud de onda con la que opera el radar es conocida como la **región óptica**. En la práctica, la mayoría de las aplicaciones del radar tienen lugar en la región óptica.

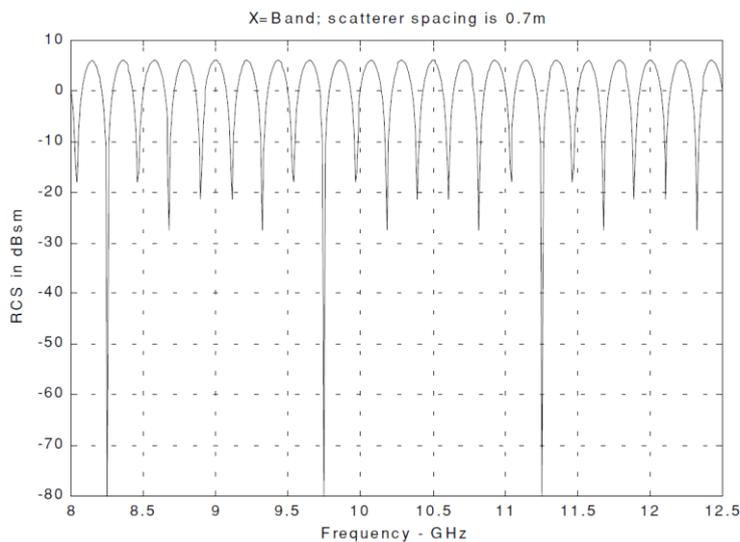
La demostración de que la RCS depende de la frecuencia, considera el experimento que se muestra en las figuras 2-2 y 2-3. En este caso, dos dispersores isotrópicos situados en campo lejano, están situados en la línea de vista (*Line of Sight, LOS*) con el radar. Midiendo la RCS compuesta devuelta por ambos elementos, se mide variando la frecuencia del transmisor desde 8 GHz hasta 12.5 GHz (banda X). Las figuras 2-4 y 2-5 muestran la RCS compuesta, al mismo tiempo que la frecuencia para espacios entre dispersores de 0.1 y 0.7 metros.



**Figura 2-1 Experimento que demuestra la dependencia de la RCS con respecto a la frecuencia. Distancia = 0.1, o 0.7 m. [2]**



**Figura 2-2 Dependencia de la RCS con respecto a la frecuencia, espacio entre dispersores 0.1 m[2]**



**Figura 2-3 Dependencia de la RCS con respecto a la frecuencia, espacio entre dispersores 0.7 m[2]**

Con estas dos figuras se evidencia que la variación de la RCS depende de la frecuencia del sistema. Pequeños cambios de frecuencia pueden provocar grandes fluctuaciones de la RCS cuando el espacio entre dispersores es amplio. Por otro lado, cuando los centros de dispersión están relativamente próximos, se requiere una mayor variación en frecuencia para provocar cambios importantes en la RCS [10].

## 2.2 Radares de Onda Pulsada

Los radares se pueden clasificar dependiendo de la plataforma sobre la que estén montados en radares en tierra, para aviones, para vehículos espaciales o montados sobre buques. También se pueden clasificar en numerosas categorías dependiendo de las características específicas de cada radar, como la banda de frecuencia en la que trabaja, el tipo de antena, y la forma de onda utilizada. Otra clasificación sería atendiendo a la misión o función que cumpla ese radar, lo que incluiría: radares meteorológicos, de adquisición y búsqueda, de seguimiento, direcciones de tiro, alerta temprana, más allá del horizonte, etc.

Sin embargo, la clasificación más ampliamente utilizada, tiene en cuenta la forma de onda que utilizan o por la frecuencia en la que operan. Por tanto, si consideramos la forma de onda, los radares pueden ser Radares de Onda Pulsada o Radares de Onda Continua.

Los radares de pulsos utilizan como forma de onda un tren de pulsos (en la mayoría de los casos con algún tipo de modulación). Dentro de estos radares de onda pulsada nos podemos encontrar con aquellos que tienen una Frecuencia de Repetición de Pulsos (o PRF, por su acrónimo en inglés) baja, media o alta. Según [2], los radares con una PRF baja son utilizados principalmente para medir distancias de blancos, en los cuales, su velocidad radial no es de interés. Los radares que trabajan con una PRF alta son mayoritariamente usados para medir velocidad.

Por otra parte, los radares de Onda Continua (denominados CW, por sus siglas en inglés) son aquellos que emiten continuamente energía electromagnética, y por tanto, utilizan antenas separadas para receptor y transmisor. Los radares de Onda Continua pueden medir de una forma precisa la velocidad radial (cambio aparente en frecuencia) y la posición angular del blanco. La información en distancia del blanco no puede ser extraída sin utilizar algún tipo de modulación. El principal uso de los radares de onda continua sin modulación es búsqueda y seguimiento de blancos móviles así como el guiado de misiles.

Tanto los radares pulsados como los de onda continua pueden medir tanto distancia como velocidad radial del blanco, utilizando diferentes esquemas de modulación.

### 2.2.1 Particularidades de los radares pulsados

Los radares pulsados calculan la distancia mediante el cálculo de tiempo que tarda un pulso en recorrer el camino de ida y vuelta hasta el blanco. Las medidas de velocidad o Doppler pueden ser realizadas en cualquiera de los dos caminos [3]. Si disponemos de medidas de distancia precisas entre dos pulsos consecutivos, entonces la frecuencia Doppler puede ser extraída del porcentaje de la distancia  $R = \Delta R / \Delta t$ . Esta aproximación es viable siempre y cuando el cambio en la distancia no sea demasiado grande en el intervalo  $\Delta t$  [6]. La forma de onda de los radares pulsados queda completamente definida por los siguientes parámetros:

- a) **La frecuencia de la señal portadora**, que puede variar dependiendo de los requerimientos de diseño y de la misión del radar.
- b) **El ancho de pulso**, que está estrechamente ligado al ancho de banda y define la resolución en distancia.
- c) **La modulación en frecuencia**; que permite comparar las señales transmitidas con las recibidas. Se emite una señal (una senoide) a una frecuencia que va variando de forma constante con el tiempo, de forma que cuando llega el eco, su frecuencia será diferente de la de la señal original, comparándolas se puede saber cuánto tiempo ha transcurrido y por tanto cuánta distancia hay hasta el blanco. A mayor desvío en frecuencia mayor distancia.
- d) **La frecuencia de repetición de pulsos** (o PRF por su acrónimo en inglés, *Pulse Repetition Frequency*). La PRF debe ser elegida para evitar tanto ambigüedades Doppler como en distancia y a la vez maximizar la potencia media transmitida.

Una baja PRF puede proporcionar, grandes distancias radar sin ambigüedad pero lleva consigo una grave ambigüedad Doppler, puesto que la regla general es que a menores frecuencias menor refresco de datos y mayores distancias de alcance radar.

Con una PRF media se debieran conseguir resolver las ambigüedades en distancia y en Doppler, además, el nivel de su potencia media transmitida alcanza niveles más aceptables que los de baja PRF. Formas de onda con una alta PRF alcanzan unos niveles de potencia media transmitida superiores a las dos anteriores y excelentes capacidades anticlutter. Como desventaja, el utilizar altas PRF implica

amplias ambigüedades en distancia. Los radares que utilizan estas altas PRF son conocidos habitualmente como Radares Doppler Pulsados o sus siglas en inglés (PDR). Las ambigüedades en distancia y Doppler se encuentran resumidas en la tabla 3.1.

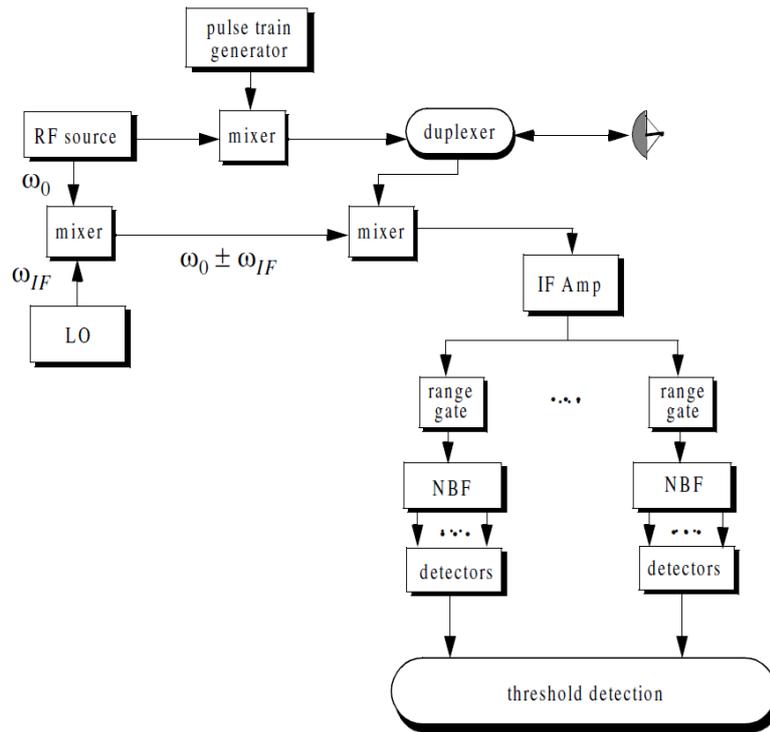
La distinción entre PRF altas, medias o bajas es casi arbitraria y depende de los modos de operación del radar en cuestión. Por ejemplo, se considera que la PRF de un radar de 3KHz es baja si su máxima distancia de detección es menor de 30Km. Sin embargo, la misma PRF sería considerada como media si la máxima distancia de detección estuviera por encima de los 30 Km.

Los radares pueden utilizar una PRF fija o variable. Por ejemplo, el filtro para blancos en movimiento (MTI) usa PRF variables para evitar las velocidades ciegas. Esta PRF variable es conocida como PRF staggering en inglés. Las PRF variables son utilizadas también para eliminar la ambigüedad en distancia y Doppler. También se utilizan para evitar interferencias que se centren en alguna de las PRF del radar. Estas dos últimas formas de hacer uso de la PRF variable son conocidas como PRF jitter [5].

<b>PRF</b>	<b>Ambigüedad en distancia</b>	<b>Ambigüedad doppler</b>
PRF Baja	No	Sí
PRF Media	Sí	Sí
PRF Alta	Sí	Sí

Tabla 2-1 Ambigüedades con la PRF[2]

La figura 2-6 muestra el diagrama de bloques simplificado de un radar pulsado. Las puertas de distancia pueden ser utilizadas como filtros que abren y cierran en determinados intervalos de tiempo que se corresponden con la distancia de detección. El ancho de este intervalo se relaciona con la resolución en distancia que se requiera. El receptor radar a menudo introduce una serie continuada en el tiempo de puertas de distancia, donde el ancho de la puerta se corresponde con el ancho de pulso. El banco de filtros de banda estrecha (*Narrow Band Filters*, NBF), normalmente se implementa usando la transformada de Fourier FFT (*Fast Fourier Transform*), donde el ancho de banda de los filtros individuales se corresponde con la resolución en frecuencia de la FFT.



**Figura 2-4 Diagrama de bloques de un radar pulsado[2]**

### 2.2.2 Distancia máxima no ambigua

La máxima distancia sin ambigüedad o máximo alcance no ambiguo, se define como la distancia máxima a la que un blanco produce ecos que llegan al radar antes de tener lugar la transmisión del impulso siguiente [1] [5] [7].

La distancia correspondiente al tiempo  $T$  que tarda la señal en recorrer el camino de ida y vuelta al blanco se conoce como la distancia máxima no ambigua,  $R_u$ . Observando la figura 2.7 vemos que el eco 1 representa la señal devuelta desde el blanco a una distancia  $R_1 = c \Delta t / 2$  debido al pulso 1. El eco 2 se podría interpretar como la señal devuelta por el mismo blanco debido al pulso 2, o también podría ser la señal recibida desde otro blanco que se encontrase más alejado a una distancia  $R_2$  debido de nuevo al pulso 1. En este caso,

$$R_2 = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \text{ o } R_2 = \frac{c \cdot (T + \Delta t)}{2} \tag{Ec. 22}$$

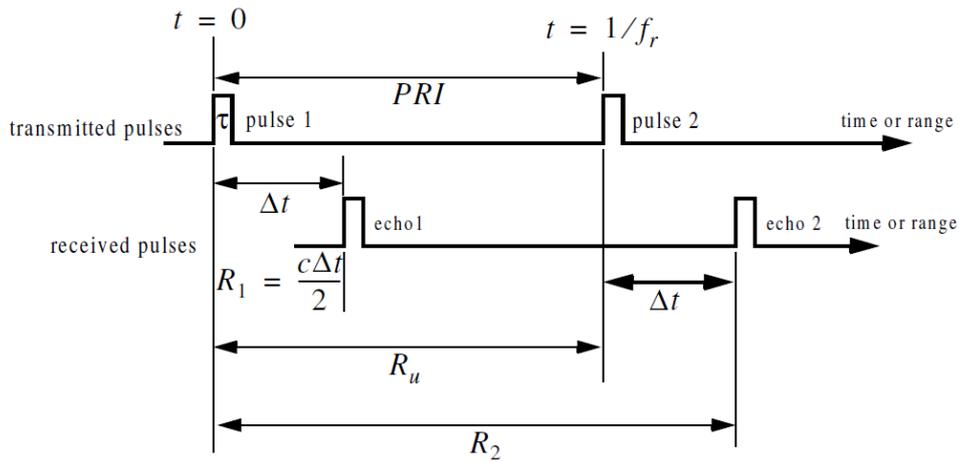


Figura 2-5 Distancia máxima no ambigua. [2]

Como se puede apreciar, la ambigüedad en distancia está asociada al eco 2. Por lo tanto, una vez que el pulso es transmitido, el radar debe esperar una cantidad suficiente de tiempo para que la señal devuelta por el blanco haya regresado antes de que se emita el siguiente pulso. Por consiguiente, la máxima distancia no ambigua debe coincidir con la mitad del PRI:

$$R_2 = c \cdot \frac{T}{2} = \frac{c}{2 \cdot f_r} \tag{Ec. 23}$$

Los radares miden la distancia y dos coordenadas angulares para determinar la posición del blanco. Los radares coherentes pueden medir directamente la velocidad radial del blanco. Un blanco se debe diferenciar de otros blancos en al menos una de las coordenadas de sus parámetros para ser medido [3].

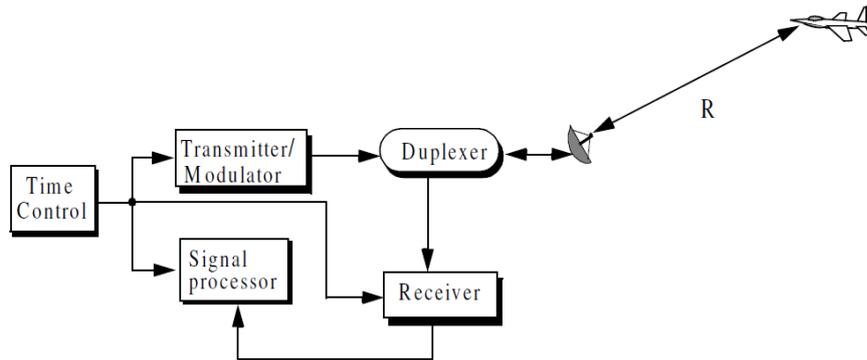
La medición de la distancia es determinada por el intervalo de tiempo entre la transmisión de la señal y la recepción de la misma. A menudo se mide estimando el centroide del pulso comprimido detectado [9].

Otras técnicas incluyen la comparación de los niveles de señal en puertas cercanas y otras más alejadas del centro de la señal [5].

La caja de control de tiempos genera la señal de sincronización requerida por el sistema. El modulador genera la señal modulada y la envía a la antena dentro del bloque del transmisor. El duplexor es el encargado de regular el cambio entre los modos transmisión y recepción y permite que con una sola antena el sistema sea capaz de recibir y transmitir a través de la misma. Durante la transmisión dirige la energía electromagnética hacia la antena. En la recepción, dirige el eco radar recibido hacia el receptor. El receptor amplifica la señal recibida y la prepara para su procesamiento. El bloque del procesador de señal es el encargado de extraer la información relativa al blanco. La distancia al blanco R, es obtenida mediante la medición del tiempo Δt desde que la señal sale de la antena hasta que regresa el eco, es el tiempo que tarda el pulso en recorrer el doble camino de entre el radar y el blanco. Teniendo en cuenta que las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz,  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s, entonces:

$$R = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \tag{Ec. 24}$$

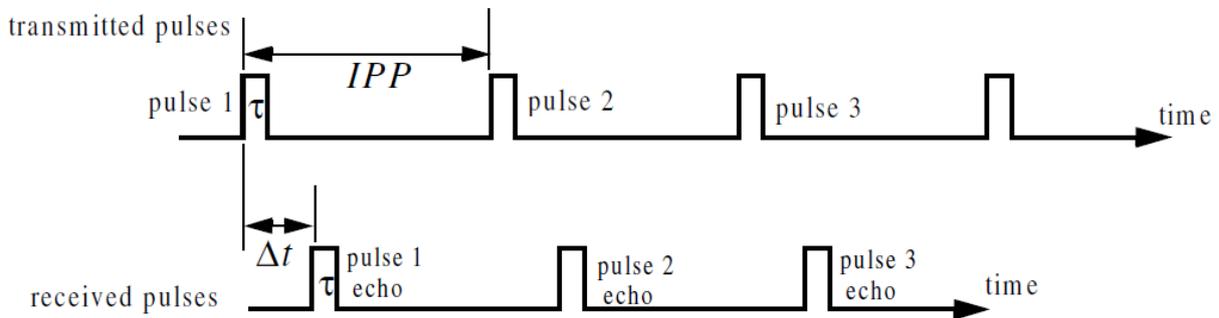
Donde la R se da en metros y Δt en segundos. La división ½ se debe a que el camino recorrido por la señal es de ida y vuelta.



**Figura 2-6 Diagrama de bloques simplificado de un radar de pulsos. [2]**

En general, un radar de pulsos transmite y recibe un tren de pulsos, como se puede apreciar en la figura 2.7.  $T$  es el período de duración del pulso (IPP) por sus siglas en inglés (*Inter Pulse Period*), y el ancho de pulso es  $\tau$ . El periodo de duración del pulso a menudo es considerado como el PRI (Intervalo de Repetición de Pulso), aunque a este último hubiera que restarle el  $\tau$  para que fuera del todo correcto. La inversa del PRI es la PRF, que se representa como  $f_r$ ,

$$f_r = \frac{1}{PRI} = \frac{1}{T} \quad (\text{Ec. 25})$$



**Figura 2-7 Tren de pulsos transmitidos y recibidos. [2]**

Durante cada PRI, el radar únicamente emite radiación el tiempo que dura  $\tau$  y escucha ecos del blanco durante el resto del tiempo del PRI. El ciclo de trabajo del radar  $d_t$  se define como el porcentaje  $d_t = \tau/T$ . La potencia media transmitida es:

$$P_{av} = P_t \cdot d_t \quad (\text{Ec. 26})$$

Donde  $P_t$  es la potencia de pico transmitida. La energía de pulso  $E_t = P_t \cdot \tau = P_{av} \cdot T = P_{av} \cdot f_r$ .

### 2.2.2 Resolución en distancia

La resolución en distancia de un radar es su capacidad para diferenciar entre blancos que están muy cercanos entre sí. Se representa por  $\Delta R$  y viene dada por la expresión:

$$\Delta R = \frac{c}{2 \cdot B} = \frac{t_R \cdot c}{2} \tag{Ec. 27}$$

Donde  $B$  es el ancho de banda de la señal, y  $t_R$  es la duración del pulso comprimido y el procesamiento del filtro adaptado que se ha usado.

Los sistemas radar están habitualmente diseñados para operar entre una distancia mínima  $R_{min}$ , y una distancia máxima  $R_{max}$ . La distancia entre  $R_{min}$  y  $R_{max}$  se divide en  $M$  puertas de distancia, cada una con un ancho  $\Delta R$ ,

$$M = \frac{R_{max} - R_{min}}{\Delta R} \tag{Ec. 28}$$

Los blancos que estén separados por al menos la distancia  $\Delta R$  serán completamente resueltos en distancia, como se puede apreciar en la figura 2-7. Los blancos que se encuentren dentro de la misma puerta de distancia pueden ser resueltos en el eje horizontal (orientación) utilizando técnicas de procesamiento de la señal.

Si consideramos dos blancos localizados a las distancia  $R_1$  y  $R_2$ , con sus correspondientes tiempos  $t_1$  y  $t_2$ , respectivamente. Denominamos a la diferencia entre las dos distancias  $\Delta R$ :

$$\Delta R = R_2 - R_1 = c \cdot \frac{(t_2 - t_1)}{2} = c \cdot \frac{\delta \cdot t}{2} \tag{Ec. 29}$$

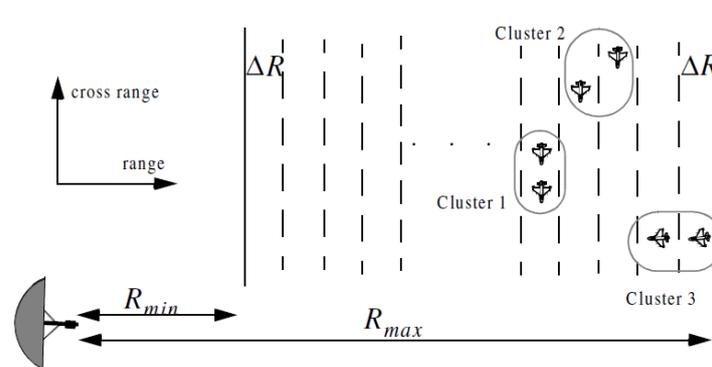


Figura 2-8 Discriminación de blancos en distancia y orientación. [2]

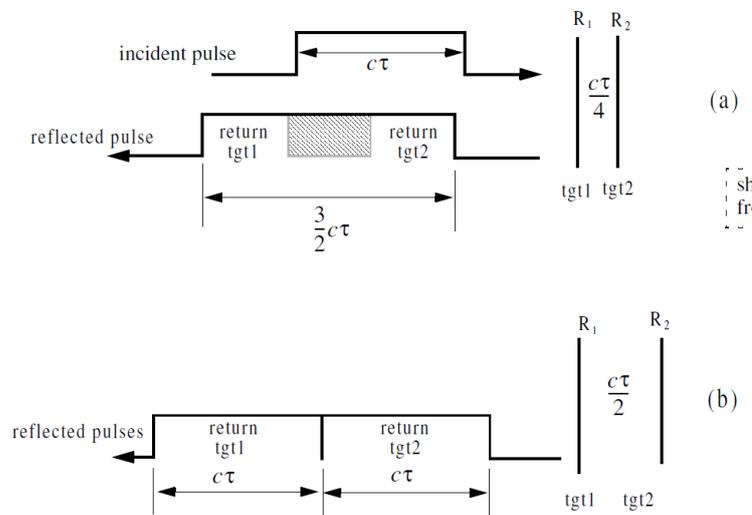
Para saber cuál es la mínima  $\Delta R$  debemos saber cuál es la mínima  $\delta t$  tal que el blanco 1 a una distancia  $R_1$  y el blanco 2 a una distancia  $R_2$  sean completamente discernibles en distancia.

Si se asume que los dos blancos están separados por  $c \cdot \tau / 4$ ,  $\tau$  es el ancho de pulso. En este caso, cuando el pulso rebote en el segundo blanco, el rebote sobre el primer blanco habría recorrido un camino de vuelta  $c \cdot \tau$ , y el pulso que retorna estaría compuesto por los dos blancos (sin poder discriminar entre los dos) como se puede apreciar en la figura 2-8 (a). Si los dos blancos están separados al menos  $c \cdot \tau / 2$ , cuando el choca contra el primer blanco, este pulso comenzará a volver

desde el segundo blanco, y esto provocará el regreso de dos pulsos distintos como se puede apreciar en la figura 2-10b. Por lo tanto  $\Delta R$  debe ser siempre mayor o igual que  $c \cdot \tau / 2$ . Y como el ancho de banda  $B$  es igual a  $1 / \tau$ , entonces

$$\Delta R = \frac{c \cdot \tau}{2} = \frac{c}{2 \cdot B} \quad (\text{Ec. 30})$$

En general, se intenta buscar formas para minimizar la  $\Delta R$  y mejorar así las prestaciones del radar. Como sugiere la ecuación (Ec. 30), para obtener una precisa resolución en distancia, es necesario minimizar el ancho de pulso. Aún así, esto reduce la potencia media transmitida e incrementa el ancho de banda de trabajo. Alcanzar una precisa resolución en distancia, manteniendo una adecuada potencia media transmitida se puede conseguir utilizando técnicas de compresión de pulsos [12].



**Figura 2-9 (a) Dos blancos no discernibles. (b) Dos blancos discernibles. [2]**

### 2.2.4 Integración de pulsos

La técnica de utilizar la suma de los ecos radar de muchos pulsos se conoce como integración de pulsos. Cuando un blanco es iluminado por el haz de radiación del radar, lo normal es que refleje varios pulsos [11]. La suma de los ecos devueltos por el blanco de sucesivos pulsos incrementa la relación señal ruido  $SNR$ . La probabilidad de detección del radar se incrementa con la suma de todos o de casi la mayoría de éstos pulsos devueltos. Según [8] se produce una mejora en el alcance proporcional a  $\sqrt[4]{n_p}$ . El tiempo que tarda en pasar el haz de la antena por el blanco  $\Delta t$  es:

$$\Delta t = \frac{\Delta \theta}{\Omega} \quad (\text{Ec. 31})$$

Donde:

$\Delta \theta$ : es el ancho de haz horizontal de la antena en grados sexagesimales.

$\Omega$ : es la velocidad de barrido de la antena en rpm (revoluciones por minuto).

El número de pulsos recibidos por tanto será:

$$n_p = \frac{\Delta t}{\tau} = \frac{\Delta \theta \cdot PRF}{\Omega} \quad (\text{Ec. 32})$$

Donde:

$\tau$ : ancho de pulso.

Existen diferentes métodos para llevar a cabo la integración de pulsos: bien sea utilizando integración coherente, donde se hace uso de la información de amplitud y de fase de la señal radiada, o bien utilizando la integración no coherente, que utiliza únicamente la información de amplitud de la señal recibida.

### 2.2.4.1 Integración coherente

La integración de pulsos se puede llevar a cabo antes del detector de envolvente. Esto es lo que llamamos integración coherente. La integración coherente conserva la fase de los pulsos recibidos, lo que provoca un incremento de la amplitud de la señal. En la integración coherente, si utilizamos un integrador perfecto (100% eficiente), al integrar  $n_p$  pulsos mejoraremos la SNR en el mismo grado de eficiencia. Por otra parte, lo normal es que se produzcan pérdidas durante la integración, que es el caso normal de la integración no coherente. Para demostrar la construcción de la señal, se considera que la señal de retorno contiene la propia señal y además una componente de ruido [5].

Un solo pulso de la SNR requerida nos da una probabilidad de detección  $(SNR)_1$ . Mientras que  $(SNR)_{n_p}$  será la SNR requerida para producir la misma probabilidad de detección cuando se integran  $n_p$  pulsos. Por consiguiente;

$$(SNR)_{n_p} = \frac{1}{n_p} \cdot (SNR)_1 \quad (\text{Ec. 33})$$

Por tanto la ecuación para calcular la distancia al blanco queda como sigue;

$$R_{max} = \left( \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma \cdot N \cdot E_i}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot K \cdot T_e \cdot B \cdot F \cdot (SNR)_1} \right)^{1/4} \quad (\text{Ec. 34})$$

Donde se han añadido los siguientes parámetros;

$N = n_p$ ; número de pulsos integrados.

$E_i$ ; eficiencia de integración.

Los requerimientos para que la integración coherente sea eficiente son los siguientes:

- Que el radar opere de forma coherente.
- Un radar estable que produzca ecos coherentes. Estos requerimientos se dan cuando se cumplen los modelos de Swerling para blancos del tipo 1 (muchos dispersores pequeños de tamaños similares y variaciones lentas “scan-scan”) y 3 (un dispersor dominante y otros dispersores menores, variaciones rápidas “pulso-pulso”), a la vez que para blancos no fluctuantes [1][2]
- Un medio de propagación estable. Según [1] esto se produce habitualmente, excepto a bajas frecuencias donde la ionosfera puede provocar fluctuaciones en la señal.

Los cambios en la frecuencia Doppler para blancos con velocidad radial diferente de 0, provocan un cambio lineal de fase pulso a pulso que impide la suma de pulsos sucesivos en fase. Si se conoce la velocidad radial del blanco, la señal procesada puede compensar estos cambios de fase. Cuando no se conoce la velocidad radial del blanco, el procesador puede considerar la distancia teniendo en cuenta posibles velocidades radiales, o se puede emplear el procesado del pulso Doppler.

Los requerimientos de recordar la fase de cada pulso transmitido a la vez que mantener la coherencia durante la propagación son muy costosos y difíciles de conseguir. En la práctica, la mayoría de los sistemas radar utilizan integración no coherente.

#### 2.2.4.2 Integración no coherente

Si la integración se realiza después del detector de envolvente hablamos de integración no coherente. Esta integración de pulsos puede ser llevada a cabo con cualquier tipo de blanco, ya sea fluctuante o no fluctuante, porque no requiere de estabilidad en frecuencia ni en fase. Las señales habrán experimentado una pérdida en la detección,  $L_D$ .

$$L_D = \frac{1 + \frac{S}{N}}{\frac{S}{N}} \quad (\text{Ec. 35})$$

Cuando  $n_p$  pulsos son integrados de forma no coherente, la relación  $(S/N_{n_p})$  señal ruido resultante, es:

$$\left(\frac{S}{N}\right) = \frac{n \cdot \left(\frac{S}{N}\right)}{1 + \left(\frac{S}{N}\right)} \quad (\text{Ec. 36})$$

Los cambios en distancia debidos a la velocidad radial del blanco pueden dar como resultado que todos los pulsos no puedan ser integrados debido a que el periodo de integración sea mayor que la resolución en distancia de la forma de onda. Esta situación se conoce como migración en distancia (*range walk*), y se puede compensar durante el procesamiento de la señal, necesitando mucha menos precisión en velocidad radial que con el cambio de fase en la integración coherente. Dado que la pérdida en detección es significativa a bajas relaciones señal ruido  $S/N$ , la integración no coherente de muchos pulsos con baja relación  $S/N$  para alcanzar una alta relación  $S/N$  es ineficiente. La ganancia en la integración no coherente es siempre menor que la ganancia en la integración coherente. Sin embargo, el bajo coste de este tipo de integradores compensa la ineficiencia de los mismos, y de cualquier forma, la detección de blancos fluctuantes puede ser mejorada mediante la integración no coherente de una pequeña cantidad de pulsos. La figura 2-8 (b) vista con anterioridad, nos muestra un receptor utilizando integración no coherente.

#### 2.2.5 Radares monoestáticos y radares biestáticos

Una de las posibles clasificaciones de los sistemas radar se basa en la ubicación (y número) de las antenas transmisora y receptora. De esta forma, los radares biestáticos son aquellos en los que la antena transmisora y la receptora están separadas, mientras que los radares monoestáticos son aquellos en los que transmisor y receptor están en el mismo lugar.

Los radares monoestáticos, que serán el objeto del presente trabajo, son los más utilizados en el ámbito de la Armada. Esto es debido principalmente al ahorro de espacio que supone un radar monoestático con respecto a otro biestático.

En un buque de la Armada podemos diferenciarlos según la función que realicen.

- a) **Radares de navegación:** Cuyo principal objetivo es auxiliar al personal en el puente, en labores de detección de posibles contactos de superficie para maniobrarlos con anticipación.

- b) **Radares de exploración aérea:** Utilizados en guerra antiaérea. Suelen ser radares con una PRF relativamente baja y con medianos o grandes alcances.
- c) **Radares de exploración de superficie:** Utilizados en guerra de superficie. Normalmente montados a mayor altura que los de navegación para obtener mayores distancias y con potencias de transmisión mayores a los de navegación.
- d) **Radares de dirección de tiro:** Diseñados para ser utilizados en coordinación con el manejo de las armas. Su discriminación en distancia es muy precisa debido a que van a ser los encargados de posicionar las armas, principalmente montajes de artillería y de efectuar el seguimiento sobre blancos en posición de ser combatidos. Es por ello, como se suele decir en artillería, el seguimiento debe de ser muy fino.
- e) **Iluminadores:** Aunque se podrían considerar como direcciones de tiro, hago una mención aparte para ellos, puesto que en algunos sistemas forman un conjunto con las direcciones de tiro de onda pulsada, y en otros como en los buques de la clase F-100 forman un sistema totalmente independiente. Son radares de onda continua para guiado de misiles sobre blancos bajo seguimiento SPY.

Los radares biestáticos se pueden clasificar en:

- a) **Radares Pseudo-monoestáticos:** Aquellos que aún teniendo las antenas de transmisión y de recepción separadas, el ángulo subtendido entre el transmisor y el receptor de destino es cercano a cero. Un ejemplo sería un sistema radar de HF que tuviera sus antenas separadas, del orden de unas pocas decenas de kilómetros y sus rangos de distancia al objetivo estuvieran entre los 1000 y 3500 km.
- b) **Radares de dispersión total:** Configuración para que la detección se produzca cuando los blancos pasen entre el transmisor y el receptor, es decir, con un ángulo biestático cerca de 180°. Es una potencial medida para la detección de aviones stealth (que utilizan tecnologías de invisibilidad), ya que la RCS se determina únicamente por la silueta de la aeronave y no se encuentra afectada por los revestimientos de sigilo o shapings. Sin embargo, debido al movimiento de los blancos, el seguimiento es muy difícil y la información en mediciones de distancia, demora y Doppler es muy inexacta.
- c) **Radares multiestáticos:** En estos radares existen al menos tres componentes. Un receptor y dos transmisores, dos transmisores y un receptor o varios transmisores y receptores.
- d) **Radares pasivos:** Pueden ser biestáticos o multiestáticos y utilizan la información de emisores que no pertenecen al propio radar.

Las principales ventajas de los radares biestáticos y multiestáticos respecto a los monoestáticos son:

- Un bajo coste de adquisición y mantenimiento. (si se utiliza el emisor de un tercero)
- Con emisiones de terceros no se necesita autorización de frecuencia.
- El receptor puede operar y ponerse en marcha con independencia del transmisor.
- Al encontrarse el receptor en un lugar desconocido y utilizar una frecuencia desconocida posee buena resistencia a las contramedidas.
- Los efectos geométricos de la RCS le afectan en menor medida.
- Su utilización en misiles superficie-aire permite un receptor ligero que pueda llevar el misil y un transmisor más pesado y de gran alcance que se encuentre en tierra o sobre otra superficie.

Las mayores inconvenientes son debidos a:

- La complejidad de estos sistemas.
- La comunicación entre los emplazamientos de los sistemas genera costes adicionales.
- El receptor pasivo depende de un tercer emisor.
- Implementación compleja.

- A necesitar visual entre los diferentes emplazamientos, posee una mala cobertura a baja altura.

### 2.2.6 Pantallas en consolas radar

Las pantallas que se pueden apreciar en las consolas radar se pueden diferenciar en tres tipos principales. Esta diferenciación es la que comúnmente se utiliza en los buques de la armada.

- a) **Pantalla Alfa:** Es la utilizada en el presente trabajo. Consiste en una pantalla en la que el eje de abscisas o eje x, representa la distancia al blanco. Generalmente se verá la señal de recepción, las perturbaciones que sobre ella se estén produciendo y un pico o varios de la señal que corresponden a los blancos cuando sobrepasan el umbral de detección y los diferentes piques de los proyectiles cuando se efectúa un ejercicio de tiro, por eso es la más utilizada en direcciones de tiro. Sobre esta señal se efectúan las correcciones en distancia.
- b) **Pantalla PPI (*Plan Position Indicator*):** La más común de las pantallas radar utilizadas, donde el radar muestra, en coordenadas polares, la ubicación de los blancos en cada una de las direcciones alrededor de la plataforma donde se ubica. Cabe destacar que no hace muchos años atrás se utilizaban las de fósforo, mientras que hoy en día priman otros tipos como las de LCD (*Liquid Crystal Display*), que son mucho más agradables para el observador. En ellas aparecen los crudos de los contactos que el radar va detectando. Es donde los operadores del CIC (*Centro de Información para el Combate*) y del puente de gobierno en los barcos de la Armada, van punteando los contactos.
- c) **Pantalla Bravo:** Es un tipo especial de pantalla que se caracteriza por estar dividida en cuadrículas. El sistema efectúa una lupa sobre lugar que interesa visualizar en el monitor. La principal función es apreciar las correcciones en deriva y distancia en los ejercicios de tiro, mediante la observación de los piques de los proyectiles con respecto al blanco. Las correcciones se efectúan teniendo como referencia las cuadrículas mencionadas anteriormente.



## 3 APLICACIÓN DESARROLLADA

### 3.1 Introducción

La aplicación desarrollada en este TFG presenta en pantalla una consola radar simplificada, donde el alumno pueda realizar sus labores de aprendizaje interactuando con el programa en sí. La consola requiere que el alumno introduzca los parámetros del transmisor, del receptor y al menos uno de los blancos de los dos que la aplicación permite, generalmente dentro de unos parámetros máximos y mínimos previamente definidos. Según los valores que este introduzca, el blanco será detectado o no, dependiendo de si el blanco está demasiado lejos o no, es decir que  $R_{blanco} > R_{max}$ , donde  $R_{max}$  es la distancia máxima a la que el radar es capaz de operar con los ajustes y parámetros introducidos por el usuario tanto para el blanco 1 como para el blanco 2.

Para acceder a la aplicación:

- a) Ejecutar el programa Matlab desde su acceso directo en el escritorio o bien desde las aplicaciones.
- b) Ejecutamos el programa principal dentro de Matlab, sin más que arrastrar el script .m hasta la ventana de comandos (*command window*) de Matlab.
- c) En ese momento, la consola aparecerá en pantalla y el alumno podrá comenzar a interactuar con ella.

A continuación se detalla el funcionamiento de la aplicación en el manual de usuario de la misma, así como una serie de ejemplos que ayuden a la interpretación de los resultados mostrados por pantalla.

## 3.2 Manual del Usuario

### 3.2.1 Interfaz de usuario

La consola del operador/alumno está dividida en cuatro secciones principales:

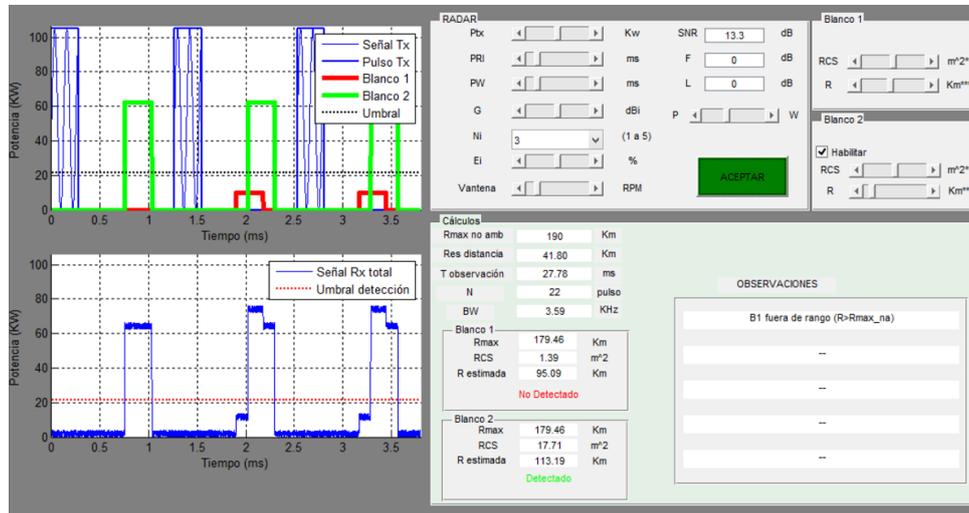


Figura 3-1 Vista general consola GUI.

A la izquierda, se dispone de dos pantallas *alfa*. A la derecha disponemos de varias secciones, entre las que se cuenta un panel radar, un panel de cálculos y otros dos más a la derecha para parámetros de los dos blancos que el usuario puede introducir.

La primera sección, a la izquierda de la pantalla, contiene dos paneles gráficos. En el superior, que se corresponde con una pantalla alfa de un radar, se pueden apreciar las señales de transmisión, tanto los pulsos (color azul de línea gruesa) como la portadora dentro de cada pulso (color azul de línea fina) y de recepción (color rojo para el blanco 1 y color verde para el blanco 2), ya teniendo en cuenta la distancia al blanco. Para ayudar a la interpretación de los resultados, se ha pintado en pantalla igualmente el umbral de detección de los blancos, que definirá, a simple vista, si el blanco es detectado o no.

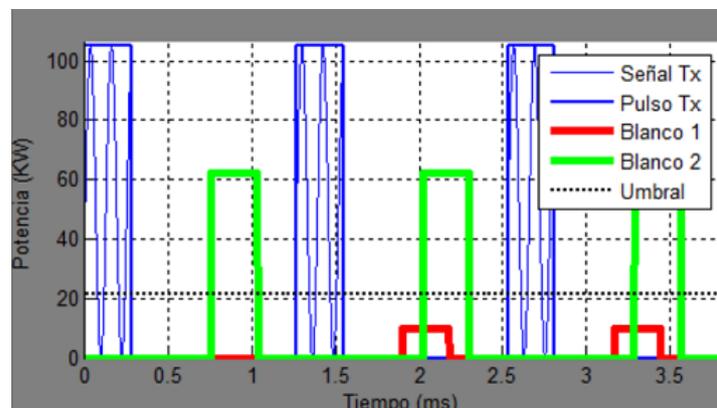
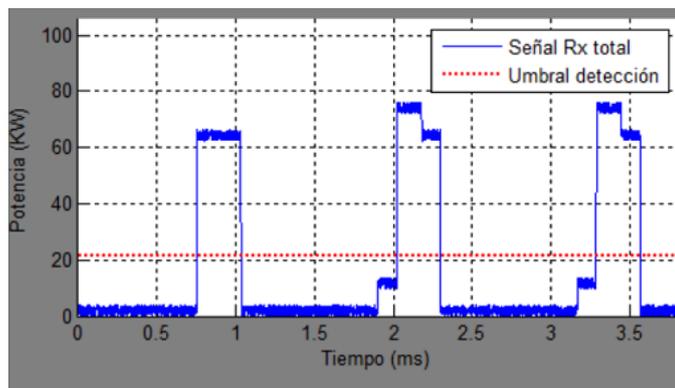


Figura 3-2 Pantalla Alfa superior.

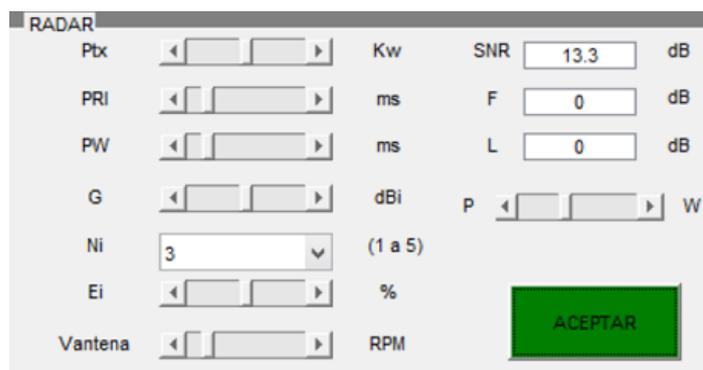
La pantalla alfa inferior refleja la señal recibida suma de ambos blancos (color azul), que sería lo que se obtendría a la entrada del receptor. Al igual que en el caso anterior, también se representa el

umbral de detección (color rojo). La aplicación permite, adicionalmente, introducir ruido blanco gaussiano que introduzca distorsión aleatoria a dicha señal (color azul).



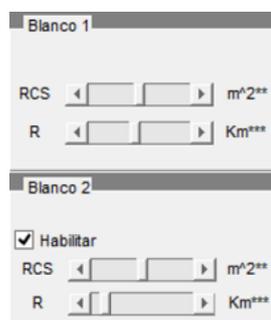
**Figura 3-3 Pantalla Alfa inferior.**

La segunda sección, que se encuentra en la parte central superior de la consola, es la que corresponde a la entrada de parámetros en el transmisor y receptor por parte del operador. La parte izquierda es para el transmisor y la derecha para el receptor. Se ha incluido también en esta sección un botón de ACEPTAR, cuya principal misión es refrescar la pantalla cada vez que se cambie alguno de los parámetros o ajustes dentro de la misma.



**Figura 3-4 Sección parámetros radar.**

En la parte superior derecha se encuentra la sección destinada para que el operador introduzca los blancos. El blanco 1 aparecerá habilitado por defecto, mientras que el blanco 2 se podrá habilitar o no gracias al checkbox correspondiente.



**Figura 3-5 Sección para introducción de blancos.**

La última sección es la que se encuentra en la zona central e inferior derecha (véase Figura 3-6). Es la parte de la consola destinada a realizar los cálculos y mostrárselos al operador. Además, existe en

esta sección un panel de observaciones con cinco posibles incidencias que afectan a la posibilidad de adquirir el blanco. El operador es avisado con notificaciones de por qué no está detectando el blanco.



Figura 3-6 Sección de cálculos y observaciones.

La primera y tercera observaciones señalan los casos en los que los blancos 1 y 2 estén fuera de rango, respectivamente. Es decir, ambos textos indican si los blancos se encuentran a una distancia mayor que la distancia máxima no ambigua (calculada a partir de la Ec. 22).

La segunda y cuarta observaciones, indican al operador que los blancos 1 y 2 respectivamente no se pueden detectar porque se encuentran demasiado cerca del radar, es decir, su R es menor que la resolución en distancia Res\_distancia (calculada a partir de la Ec. 27).

La quinta y última observación de este panel, se produce cuando los blancos 1 y 2 quedan solapados en distancia, es decir, en el caso en que el radar fuese incapaz de diferenciar uno de otro. Esto se debe a que el valor absoluto de la resta de las distancias R1 y R2 que han sido introducidas por el operador es inferior al valor de la resolución en distancia Res\_distancia, ya visto con anterioridad.

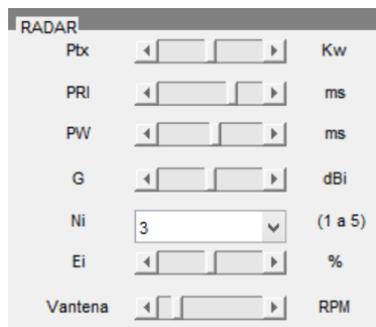
### 3.2.2 Introducción de los datos del Transmisor

Dentro de la sección de introducción de parámetros del radar, la parte izquierda corresponde a los parámetros del transmisor. De arriba abajo, estos parámetros son:

- **Ptx: Potencia de transmisión.** El alumno modifica este parámetro mediante un cajetín de barra. Los parámetros van desde 1 a 10 KW (Kilovatios). El parámetro por defecto es 5.5 KW. Se han utilizado unidades del orden de KW en lugar de MW (Megavatios) por cuestiones de representación gráfica en pantalla. Si el radar transmitiera en MW y la recepción fuese del orden de los mw (milivatios), sería difícil representar la señal recibida con respecto a la transmitida, es decir, las dos a la vez, sin que la recibida llegase a apreciarse. Se llega por tanto, a esta situación de compromiso.
- **PRI: Intervalo de Repetición de Pulso.** En este otro cajetín de barra, los parámetros van desde 1 hasta 3 ms (milisegundos). El parámetro por defecto es 1.5 ms. La PRI será tenida muy en cuenta en la programación ya que será la base de nuestro eje de tiempos, situado en eje de abscisas.
- **PW: Ancho de Pulso.** Aquí la barra del cajetín permite una selección desde 0.1 hasta 1. El valor por defecto es 0.55. Este parámetro está referenciado al PRI, es decir, aunque las

unidades están en ms, realmente se está utilizando un porcentaje % del PRI, y es debido a funciones de representación en la gráfica. Lo que se pretende es que la señal transmitida sea visible, ya que si utilizáramos valores más reales del orden de los microsegundos, esta sería prácticamente imperceptible por el operador.

- **G: Ganancia de Transmisión.** Los valores en la barra dejan seleccionar entre 10 y 50 dBi (decibelios isotrópicos, es decir con un diagrama de radiación de una antena isotrópica), por defecto 30 dBi. Este valor de Ganancia será utilizado también como ganancia de recepción, suponiendo unas condiciones ideales y sobre todo para facilitar los cálculos.
- **Ni: Número de pulsos a integrar.** En esta ventana desplegable se deja escoger entre 1 y 5 pulsos, para su integración. El valor por defecto es de 3 pulsos. El número de pulsos elegido vuelve a ser restringido a 5 por cuestiones de representación gráfica, que se pueda diferenciar en la pantalla alfa superior el número de pulsos integrados, así como la señal portadora.
- **Ei: Eficiencia de integración.** El usuario puede elegir entre un porcentaje que va desde 0.1 a 1. El valor por defecto es 0.55 por ser la media entre ambos valores.
- **Vantena: Velocidad angular de giro de la antena.** La barra del cajetín permite parámetros desde 0 a 20 RPM (Revoluciones por Minuto). Su valor por defecto es de 10 RPM.
- **Fo: Frecuencia portadora:** Este no es un parámetro modificable por el usuario. A la hora de realizar los diferentes cálculos de posicionamiento del blanco, se ha utilizado un valor un valor de 8 GHz. Sin embargo a la hora de pintar en la gráfica, se tomará Fo directamente en GHz. De esta forma, se puede apreciar con mayor nitidez en pantalla la señal portadora dentro del ancho de pulso transmitido, sin caer en problemas de resolución en tiempo y frecuencias de muestreo extremadamente elevadas.



**Figura 3-7 Parámetros del transmisor.**

### 3.2.3 Introducción de los datos del Receptor

Siguiendo con la sección de introducción de parámetros radar, en la parte derecha de la misma se encuentra la sección perteneciente a la recepción. Los parámetros que el usuario puede introducir son los siguientes:

- **SNR: Relación Señal Ruido.** Parámetro que señala la relación de compromiso entre la probabilidad de detección  $P_D$  y la probabilidad de falsa alarma del radar,  $P_{fa}$ . Este cajetín deberá ser rellenado de forma manual por el operador. Su valor está limitado entre 1 y 20 dB, y tomará un valor por defecto de 13.3 dB que se corresponde con una probabilidad de falsa alarma  $P_{fa}$  de  $10^{-6}$  y una probabilidad de detección  $P_D$  de 0.9 según se muestra en [2].

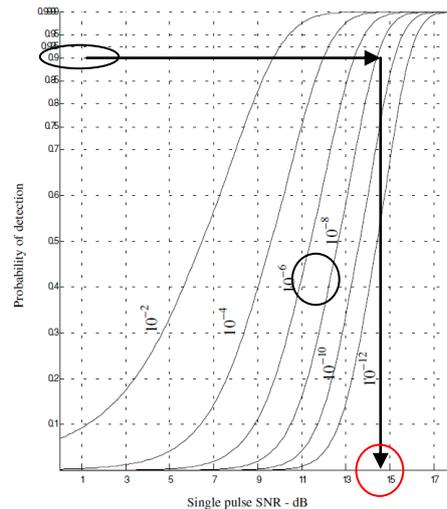


Figura 3-8 Probabilidad de detección usando un solo pulso SNR, para varios valores de Pfa. [2]

- **F: Figura de Ruido.** La figura de ruido indica cómo se relacionan las SNR a la entrada y a la salida del receptor. Cuanto mayor sea su valor, peor será el receptor, y por lo tanto, menor será la capacidad de detección del radar. Sus valores están comprendidos entre 0 y 20 dB que deberán ser introducidos por el usuario. Su valor por defecto es 0 dB considerando que nos encontramos ante un receptor ideal.
- **L: Pérdidas del receptor.** Este parámetro representa las pérdidas genéricas del receptor (por cableado, conectores, acoplamientos, etc.). Al igual que el anterior, a mayor valor, menor capacidad de detección del radar. Su rango de valores comprende entre 0 y 20 dB y que también deberán ser introducidos por el usuario. El valor por defecto es 0 dB considerando un receptor ideal.
- **P: Pérdidas por ruido.** El usuario tiene la posibilidad de generar, de forma sintética, ruido blanco gaussiano (aleatorio), que distorsiona la señal recibida asemejándola a la que recibiríamos en la realidad debido a diferentes perturbaciones del medio. Para que sus efectos sean apreciables por el operador, se permite proporcionar una potencia de ruido que va de 0 a 10 W, siendo el valor por defecto 0 W, suponiendo condiciones ideales. Es el usuario el encargado de introducir éstos valores de distorsión mediante el cajetín de barra correspondiente.

SNR	<input type="text" value="13.3"/>	dB
F	<input type="text" value="0"/>	dB
L	<input type="text" value="0"/>	dB
P	<input type="text" value="0"/> <input type="text" value="10"/>	W
<input type="button" value="ACEPTAR"/>		

Figura 3-9 Parámetros del receptor.

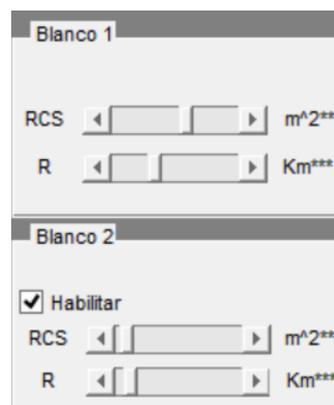
### 3.2.4 Introducción de los datos del blanco

Para poder visualizar características como la resolución en distancia, la aplicación permite seleccionar entre uno o dos blancos. Por tanto, en la interfaz gráfica, esta sección se encuentra dividida en dos (2) subapartados, la superior para la introducción de parámetros del Blanco 1 y la inferior para introducción de parámetros del Blanco 2.

Con respecto al blanco número 1, el alumno tendrá que modificar los parámetros de RCS (Superficie Equivalente Radar) en metros cuadrados y R (distancia) en Km del blanco. La barra del cajetín de la RCS permite mediante su deslizamiento variar los valores de 1 hasta 10 metros cuadrados, siendo su valor por defecto de  $5.5 \text{ m}^2$ . Un blanco real, tendrá en general, una RCS que proporcionará niveles de potencia recibida del orden de los mW. Esto hace difícil su representación en una gráfica conjunta con la señal transmitida (varios miles de veces superior). Por tanto, para labores de representación y de realismo en los cálculos, la aplicación aplica a estos valores, de forma interna, un multiplicador, de forma que la señal recibida se mantenga, en el peor de los casos, en una fracción de 1/10 de la señal transmitida. Es por este motivo que en pantalla aparece un asterisco en la RCS (RCS\*\*).

La distancia al blanco tiene una limitación adicional. En realidad, el operador no está eligiendo una distancia absoluta con respecto al radar, sino que está eligiendo una distancia relativa del blanco, con respecto al intervalo de distancias marcado entre 0 y la distancia equivalente al tiempo  $N \cdot PRI$ . Por tanto, la distancia R también aparece en pantalla con un asterisco, siendo su multiplicador el valor  $mR = \frac{c \cdot N_i \cdot PRI}{2}$ . De esta forma, se garantiza que el blanco siempre cae dentro de la ventana temporal que está visualizando el operador.

La configuración del blanco 2 es idéntica a la del blanco 1, con la salvedad de que, por defecto, está deshabilitado. Para que se pueda interactuar con el blanco 2 se debe habilitar esta opción marcando el cajetín correspondiente, *Habilitar*.



**Figura 3-10** Datos de los blancos.

### 3.2.6 Cálculo de la posición del blanco y estimación de su RCS

Para calcular la posición del blanco, tanto para el blanco 1 como para el blanco 2, el programa utiliza como variable la RCS introducida por el operador mediante el cajetín de barra. Sus valores se mueven en un margen de 1 a  $10 \text{ m}^2$  y el programa tiene por defecto introducido un valor intermedio de  $5.5 \text{ m}^2$ . Con este valor y los datos provenientes del transmisor, el programa calcula mediante la ecuación (Ec. 31) la distancia máxima a cada uno de los blancos.

Cuando lo que se pretende es el cálculo de la RCS de alguno de los blancos, entonces se despeja esta de la ecuación (Ec. 31). Tomando como parámetros la distancia R introducida por el operador en el cajetín de barra R y los datos seleccionados por el operador en el Radar.

Cálculos		
Rmax no amb	270	Km
Res distancia	36.72	Km
T observación	16.67	ms
N	10	pulso
BW	4.08	KHz
Blanco 1		
Rmax	178.30	Km
RCS	16.85	m <sup>2</sup>
R estimada	113.42	Km
Detectado		
Blanco 2		
Rmax	178.30	Km
RCS	39.00	m <sup>2</sup>
R estimada	172.53	Km
Detectado		

Figura 3-11 Posición del blanco y estimación de su RCS.

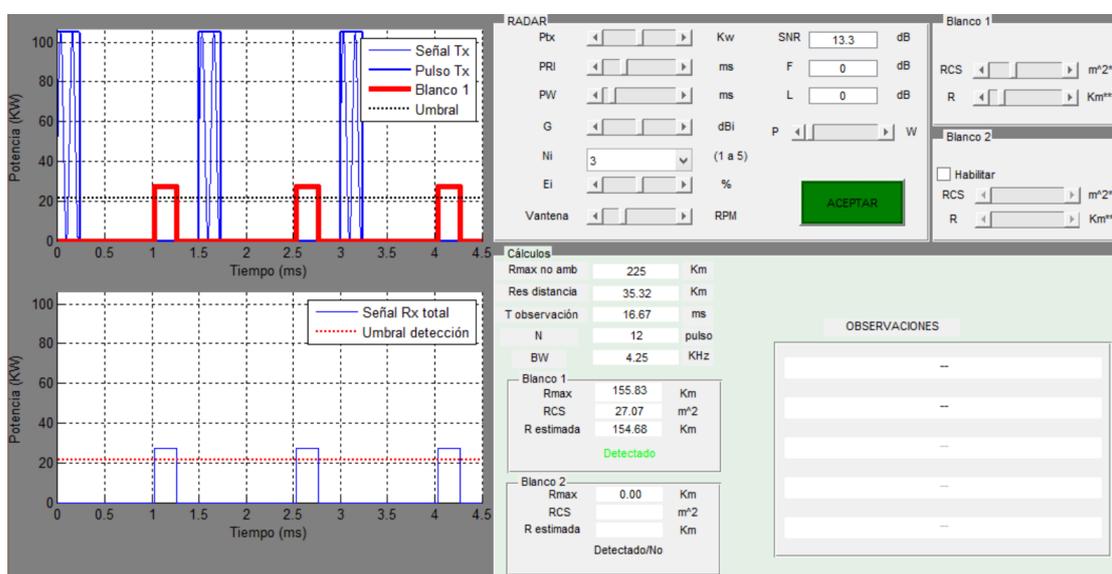
## 4 RESULTADOS

### 4.1 Introducción

A continuación se presentan los resultados del trabajo. Estos tienen como fin adiestrar al operador en la interpretación de los datos que aparecen por pantalla. Los más significativos son los siguientes, aunque las variables y posibilidades que ofrece el programa serían muchísimas más.

### 4.2 Detección de blancos simples

El primer ejemplo (Figura 4-1), muestra la detección de un blanco sin ambigüedad ubicado dentro de su distancia máxima de detección. El radar en este caso, debería detectarlo sin problemas, lo que se puede comprobar al observar que aparece como “Detectado” (texto en verde en la imagen), a la vez que se ve cómo la señal recibida supera el umbral de detección en ambas pantallas alfa. Asimismo, podemos comprobar que la distancia estimada del blanco (R estimada) cae dentro de la distancia máxima no ambigua, dato que se observa visualmente a simple vista, al comprobar que el eco del blanco se recibe de forma previa a la transmisión del segundo pulso.



**Figura 4-1 Blanco sin ambigüedades cumpliendo distancias.**

El segundo ejemplo (figura 4-2) consiste en la detección de dos blancos sin ambigüedad y dentro de la distancia máxima de detección con ruido. En este caso, se ha habilitado el segundo blanco, lo cual se puede comprobar en el cajetín “Habilitar” del blanco 2. Vemos cómo los dos blancos se encuentran lo suficientemente separados en distancia, para que el radar sea capaz de diferenciarlos, (blanco 1 en rojo y blanco 2 en verde). Los dos cumplen que su distancia estimada ( $R$  estimada) es inferior a la distancia máxima no ambigua ( $R_{max}$  no amb) e inferior a la distancia máxima ( $R_{max}$ ), además los dos se encuentran por encima del umbral de detección en la pantallas alfa superior e inferior, con lo cual son detectados. Lo que se puede comprobar en el texto verde dentro de las secciones de blanco 1 y blanco 2, “detectado”. Se puede apreciar la aparición de ruido en la pantalla alfa inferior, introducido mediante el cajetín de barra “P” del panel radar.

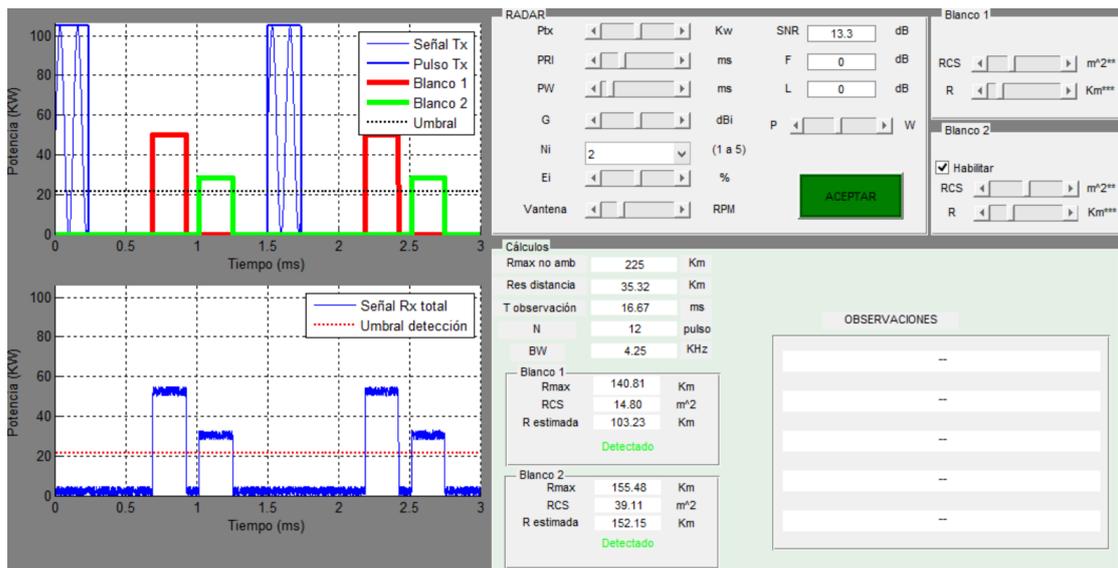


Figura 4-2 Dos blancos sin ambigüedades cumpliendo distancias con ruido.

La figura 4-3 reproduce una situación en la que se detecta un blanco (Blanco 1) dentro de su rango de detección, sin ambigüedades, mientras que existe un segundo blanco débil (Blanco 2), que queda sin detectar, al estar más alejado de su alcance máximo permitido (que dependerá de los parámetros introducidos por el usuario). En este caso, el blanco 1 (en rojo) cumple todos los requisitos para ser detectado: distancia estimada por debajo de la distancia máxima no ambigua y por debajo de la distancia máxima de detección para estos parámetros de ajuste del receptor y transmisor. Sin embargo, el blanco 2 (en rojo), aún cumpliendo que se encuentra por dentro de la distancia máxima no ambigua, está más lejos que la distancia máxima a la que el radar es capaz de detectarlo con esta configuración. Esto se puede apreciar claramente en que no supera el umbral de detección ninguna de las pantallas alfa, así como el mensaje en rojo de “No detectado”.



**Figura 4-3 Primer blanco detectado, segundo por debajo del umbral de detección.**

### 4.3 Detección de blancos ambiguos

En la figura 4-4 se aprecia cómo el blanco 1 se encuentra situado más allá de la máxima distancia no ambigua. La aplicación lo da como no detectado (texto en rojo en la imagen) y aparece una alarma en el panel de observaciones que indica: “*B1 fuera de rango (R > Rmax\_na)*”. En la pantalla alfa superior se aprecia cómo el primer blanco aparece en pantalla después de que se haya transmitido el segundo pulso. El blanco 2 (en verde) en cambio, cumple todas las condiciones para ser detectado.

Adicionalmente, en el caso del blanco 1 (blanco más allá de la distancia no ambigua), el radar interpretaría el eco recibido por el blanco 1 como una respuesta al segundo pulso que ha transmitido. Esto significaría que el sistema debería fallar al hacer el cálculo de la distancia a la que se sitúa el blanco, dado que este sería interpretado como un blanco de baja RCS que está relativamente cerca del radar (cuando en realidad se trata de un blanco de RCS elevada situado muy lejos).

La aplicación desarrollada muestra dicha problemática a través del campo de cálculos, sin más que fijarse en los campos de distancia estimada del blanco (Restimada) y distancia máxima no ambigua. Por la pantalla alfa superior se puede ver claramente como el blanco 1 se encuentra a una distancia mayor que la no ambigua, y sin embargo, en la Restimada aparece la estimación de distancia tomando como referencia el pulso transmitido más cercano (el segundo en este caso), con el consiguiente error en distancia.

Este criterio de diseño tiene como objetivo que el usuario aprenda que, mediante la correcta configuración del PRI se puede intentar solventar este problema.

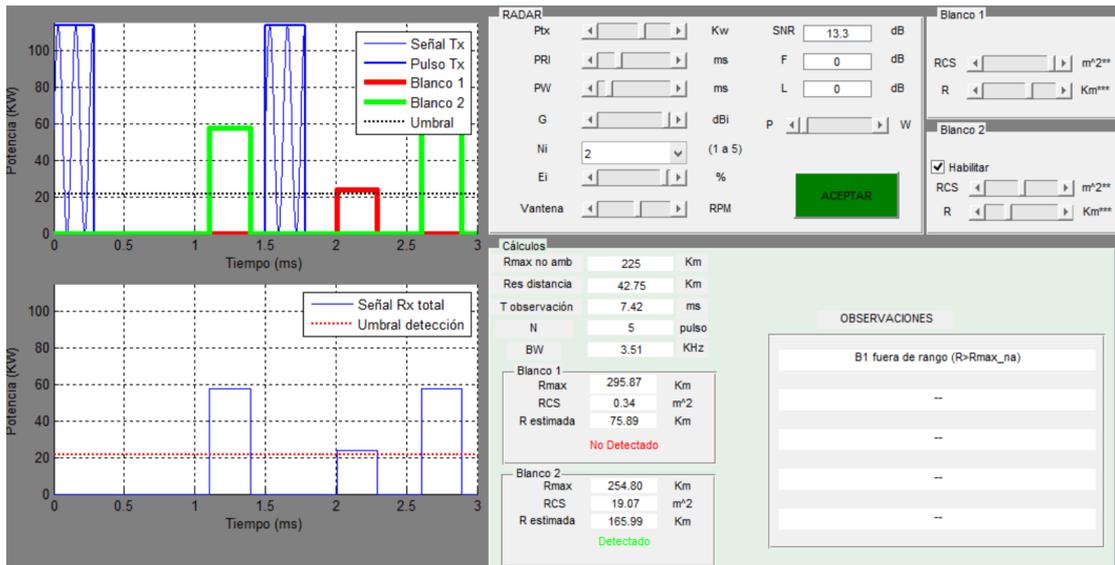


Figura 4-4 Primer blanco con ambigüedad en distancia y segundo sin ella.

#### 4.4 Discriminación de blancos en distancia

En la figura 4-5 vemos los blancos 1 y 2 claramente diferenciados y sobrepasando el umbral de detección (puntos discontinuos, en negro en la pantalla alfa superior y en rojo en la pantalla alfa inferior). Además, la consola muestra las alarmas de blanco detectado en ambos casos.

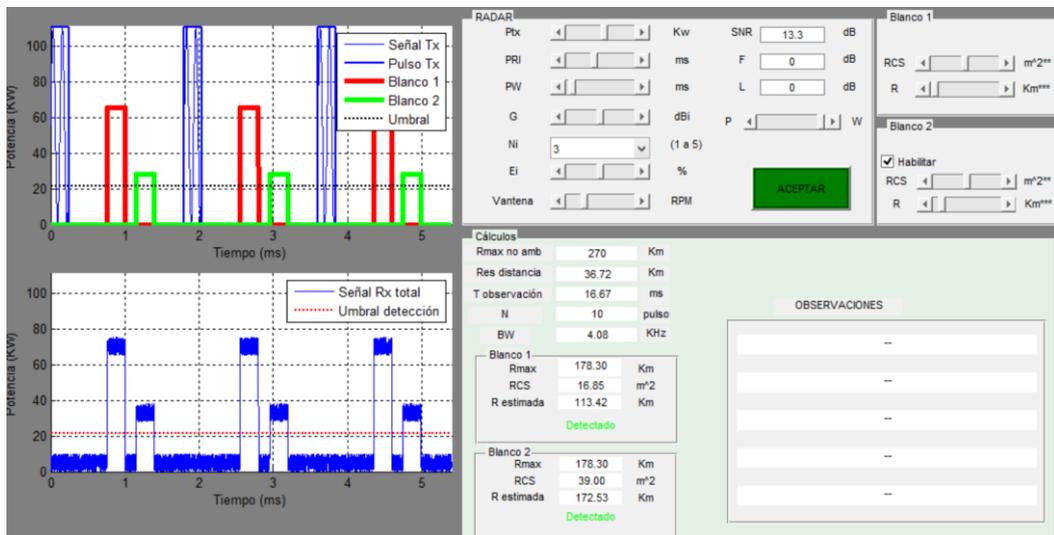
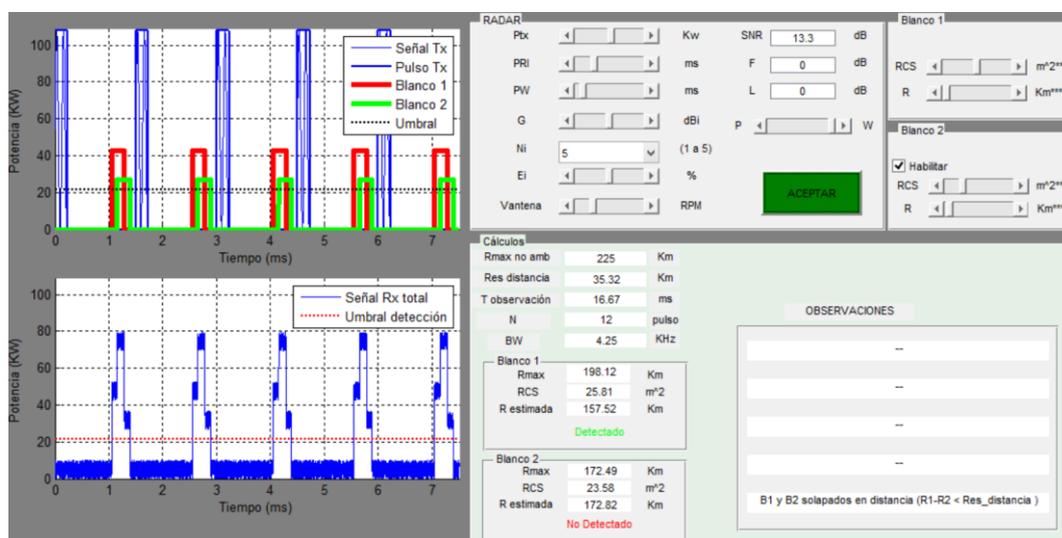


Figura 4-5 Diferenciación entre blancos contiguos.

En la figura 4-6 se pueden observar dos blancos solapados en distancia. En este caso, como la distancia entre blancos es menor que la resolución del radar, este lo interpreta como un único blanco (de RCS variable en tiempo), mediante la suma de ecos de los dos blancos.

La suma de los retornos de ambos blancos se puede observar en la pantalla alfa inferior, que incluso podría dar a entender que se trata de un blanco de mayores dimensiones y con una forma diferente de la que en realidad tienen cada uno de ellos por separado, exactamente igual que ocurre en la vida real. La consola da el blanco uno como detectado, con su avisador en verde “detectado” y el segundo blanco como no detectado, alarma en rojo “no detectado”. Aún cumpliendo ambos blancos las condiciones de que sus distancias estimadas estén por debajo de la distancia máxima no ambigua, así

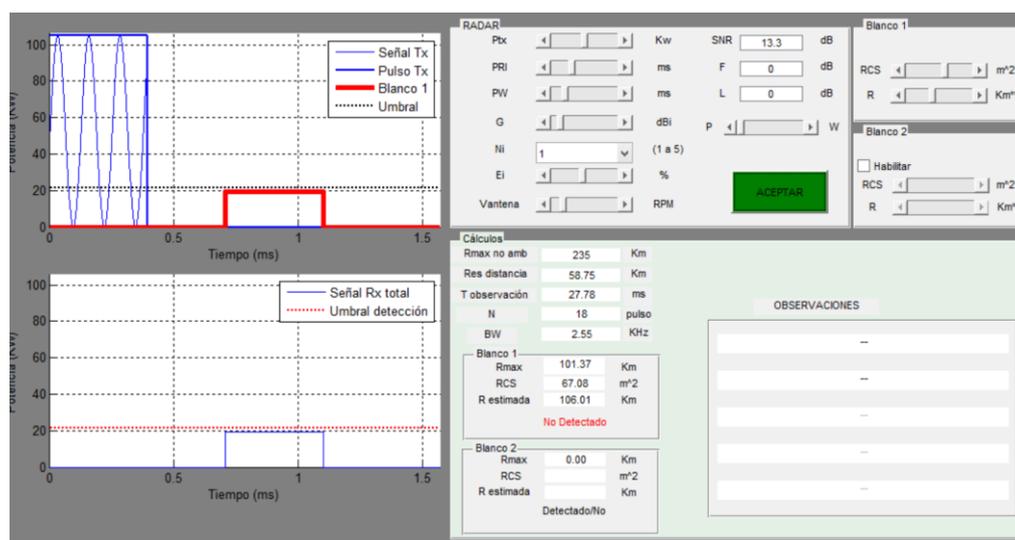
como por debajo de sus distancias máximas de detección, superando ambos el umbral de detección, el sistema los detectará como un único blanco. Se puede ver que en el panel de observaciones aparece el mensaje “B1 y B2 solapados en distancia ( $R1-R2 < Res\_distancia$ )”.



**Figura 4-6 Blancos solapados en distancia.**

## 4.5 Integración de pulsos

En las figuras 4-7 y 4-8 se puede observar cómo la aplicación simula la detección sin integración y con la integración de cinco pulsos, representados en las dos pantallas alfa. De hecho, en la primera ventana, el blanco no es detectado y en el segundo caso con integración de pulsos sí. La integración permite elevar el rango de detección del sistema. Se puede elegir el número de pulsos a integrar en la ventana de ajustes radar Ni (número de pulsos integrados).



**Figura 4-7 Detección sin integración.**

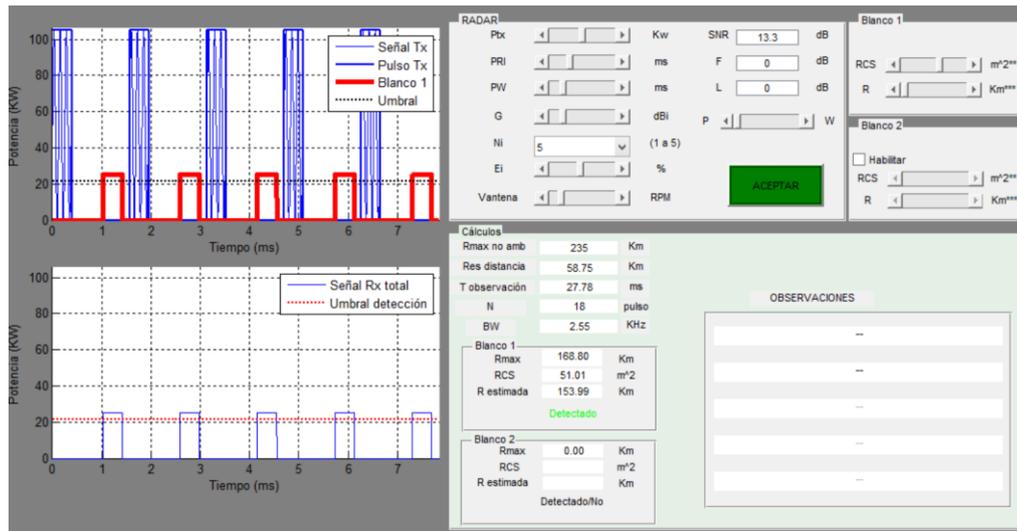


Figura 4-8 Integración de varios pulsos.

## 4.6 Impacto del ruido en la probabilidad de detección

Cuando activamos la presencia de ruido en la señal recibida, a través de la barra P (ubicada en la sección denominada *Radar*), el sistema recibe una mayor perturbación en la señal que regresa a la antena. De esta forma, puede ocurrir que blancos que en condiciones normales deberían quedar por debajo del umbral de detección, vean elevada su señal recibida, como se puede apreciar en la pantalla alfa inferior.

El sistema da el blanco como no detectado y así lo muestra reflejando la alarma en rojo “no detectado” como se puede apreciar en la figura 4-8 porque toma como referencia el nivel de umbral de detección de la señal recibida en la pantalla alfa superior (sistema ideal sin ruido).

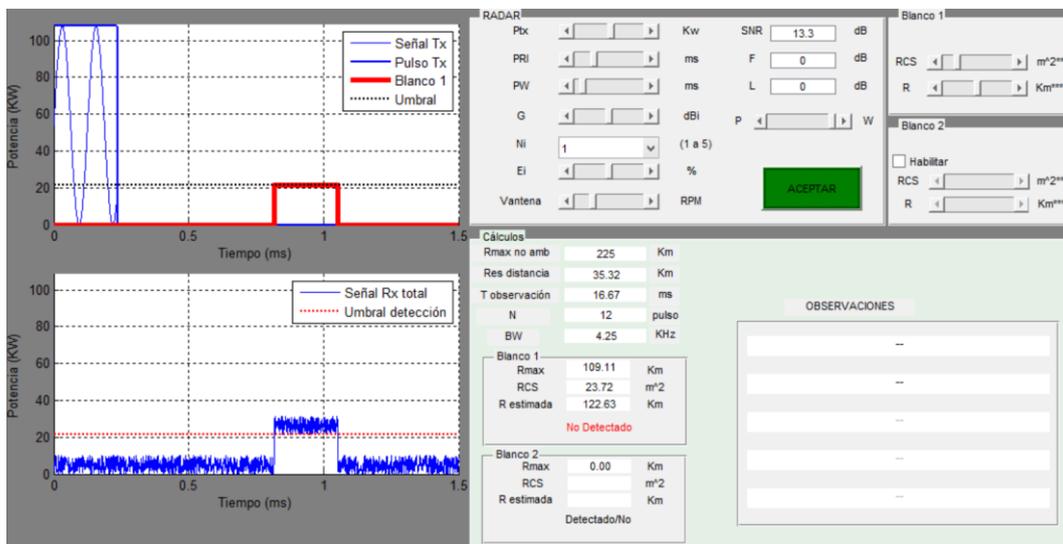


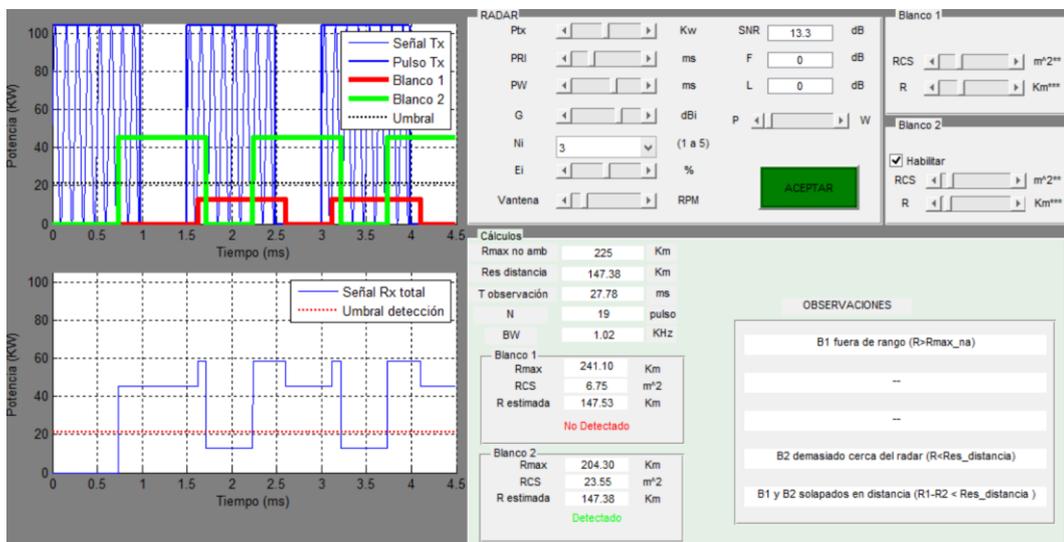
Figura 4-9 Impacto del ruido sobre la probabilidad de detección.

## 4.7 Notificaciones al operador

En la figura 4-10 se pueden apreciar todas las alarmas y observaciones de las que dispone el módulo de entrenamiento. Las que se encuentra en la sección de cálculos hacen referencia a si el blanco se ha detectado (en verde “Detectado”) o no se ha detectado (“No detectado” en rojo).

En este ejemplo, el blanco 1 no ha sido detectado porque no supera el umbral de detección de la pantalla alfa superior. En este caso, se debe a que el blanco tiene una RCS muy baja, y se encuentra muy alejado del radar, más allá incluso de la distancia máxima no ambigua. En el campo de observaciones, podemos apreciar que se indica “B1 fuera de rango ( $R > R_{max\_na}$ )”. El blanco 2 es detectado pero porque supera el umbral de detección, pero en observaciones ya aparece la leyenda “B2 demasiado cerca del radar ( $R < Res\_distancia$ )” que nos indica que el blanco se encuentra dentro de la distancia en la cual el radar todavía no ha empezado a escuchar porque se encuentra transmitiendo.

La última observación que aparece es “B1 y B2 solapados en distancia ( $R1-R2 < Res\_distancia$ )”, lo que indica que el radar va a interpretar los dos ecos conjuntamente con un único blanco. En la pantalla alfa inferior, vemos la forma que adquirirían el eco resultante de la suma de ambos no estar lo suficientemente separados. El usuario puede aprender a subsanar este tipo de problemas, sin más que ajustar apropiadamente el parámetro de ancho de pulso (PW) a un valor menor.



**Figura 4-10** Notificaciones al operador.



## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Conclusiones

Se ha diseñado una aplicación en Matlab que simula el funcionamiento básico de un radar pulsado, completamente configurable, que permite introducir uno o dos blancos para la realización de diversas comprobaciones.

Los resultados se presentan de forma gráfica e intuitiva, de forma que un usuario con escasos conocimientos de radares pueda operar la consola y entender, a simple vista, los resultados que proporciona el sistema.

Por tanto, se consideran cumplidos los objetivos fijados inicialmente para este trabajo, y se espera que suponga una mejora cualitativa en el entrenamiento de sistemas radar de los alumnos de cursos venideros.

### 5.2 Líneas futuras

Este TFG nace de la idea de crear un entrenador radar de gran envergadura, que permita disponer de todas las opciones de un radar real. La aplicación desarrollada en este trabajo sienta el esqueleto básico de la misma, por lo que existen multitud de opciones que no han sido implementadas y que pueden dar lugar a numerosas líneas futuras. Algunas de las posibles se citan a continuación:

- Desarrollo de un interfaz gráfico que permita a los usuarios poder interactuar en los parámetros de configuración del radar hasta el punto de poder competir uno contra otro en la adquisición de blancos. Y que unos buenos ajustes en los parámetros de este, den como resultado mejores adquisiciones y por consiguiente un mejor aprendizaje por parte de los usuarios del software desarrollado.
- Se puede seguir implementando el software con la creación no solo de nuevos gráficos, sino también con una o varias pantallas PPI (Plan Position Indicator) o consolas de barrido horizontal. Incluso con sonidos que delaten la presencia y detección de un blanco.
- Se pueden añadir diferentes módulos de procesamiento de señal, para hacer sistemas que reflejen más fielmente el comportamiento real de un radar, como integración de filtros adaptados que mejoren la capacidad del radar frente a posibles perturbaciones, añadir la opción de integración no coherente (permitiendo comparar con la integración coherente utilizada en este momento).

- Darle a la aplicación la posibilidad de generar blancos aleatorios que exijan al operador una reacción antes determinados problemas que se le planteen en la detección de esos blancos.
- Integrar la generación sintética de clutter y de filtros MTI (*Moving Target Indicator*) que permitan filtrar el ruido del entorno, así como discriminar los blancos en función de su velocidad.
- Integrar mapas de una zona determinada, de forma que se pueda ubicar la simulación dada en la ría de Pontevedra (o en otro lugar cualquiera), por ejemplo.
- Añadir capacidades de exploración aérea, posibilidad de elegir diferentes tipos de antenas, etc.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

A continuación se detallan todas las referencias bibliográficas utilizadas en la realización de este trabajo.

- [1] G. R. Curry, Radar Essentials, Scitech Publishing, 2012.
- [2] B. R. Mahafza, Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB, Chapman & Hall/CRC, 2013.
- [3] M. A. Díaz, «Modelado de un radar Doppler de pulsos (PDR)», 2008.
- [4] M. A. Arellano, «Exposición MATLAB para el Análisis Económico, Nivel Básico, Introducción a la Creación de Interfaces Gráficas con GUIDE», 2013.
- [5] M. I. Skolnik, Introductions to Radar Systems, Mc Graw Hill, Third Edition, 2001.
- [6] A. V. Castro, «Compendio de artículos sobre radar,» 2009.
- [7] F. Colodro Ruiz, Radar (Radio Detecting and Ranging), Sevilla: Universidad de Sevilla, 2003.
- [8] G. L. Charvat, Small and Short-Range Radar Systems, Connecticut, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014.
- [9] G. Brooker, «Sensors and Signals» Australian Centre for Fields Robotics, Sydney, 2007.
- [10] «Radar Refeectors for Cruising Sailboats» Philadelphia, 2005.
- [11] J. A. S. William L. Melvin, Principles of Modern Radar, Advanced Techniques, New Jersey: Scitech Publishing, 2013.
- [12] F. E. Natahnson, Radar Design Principles, New Jersey: Scitech Publishing, inc, 1991.
- [13] C. L. P. Bueno, Simulador de Navegación: Observador Radar, Mar de Plata: Dirección General de Educación Naval, 2007.



## ANEXO I: TIPOS DE DATOS UTILIZADOS

La siguiente tabla muestra los posibles parámetros a introducir en la aplicación, los cuales en su mayoría ya han sido especificados durante la memoria. Aún así, determinados parámetros están introducidos en el software y se reflejan en la siguiente tabla.

Presentación de datos al usuario	Recoge los datos de la aplicación y los guarda	Generación y representación gráfica de las señales	Cálculo de los resultados
Ptx = (10-1) Kw	DatosTx.Ptx = (Ptx) x 10 <sup>3</sup> W	DatosTx.Ptx = (Ptx) x 10 <sup>3</sup> W	DatosTx.Ptx = (Ptx)x10 <sup>3</sup> W
PRI = (3-1) ms	DatosTx.PRI = PRI x 10 <sup>-3</sup> s	DatosTx.B = PRI x 10 <sup>-6</sup> MHz	DatosTx.B = PRI x10 <sup>6</sup> Hz
PW = (1-0.1) ms	DatosTx.PW = PW x PRI s	DatosTx.PW = PW x 10 <sup>3</sup> ms	DatosTx.Pw = PW x 10 <sup>-3</sup> s
G = (50-10) dBi	DatosTx.Gtx = Gtx (UN)	DatosTx.G = G (UN)	DatosTx.G = G (UN)
Ni = (5-1) pulsos	DatosTx.N = N pulsos	DatosTx.N = N	DatosTx.N = N
Ei = (1-0.1) %	DatosTx.Ei = Ei %		
Vantena = (40-1) RPM	DatosTx.wAntena = wAntena		
	DatosTx.Fo = 8x10 <sup>9</sup> Hz	DatosTx.Fo = 5 Hz	DatosTx.Fo = 8x10 <sup>9</sup> Hz
SNR = 13.3dB	DatosRx.SNRmin = SNR (UN)	DatosRx.SNR = SNR (UN)	DatosRx.SNR = SNR (UN)
L = 0dB	DatosRx.L = L (UN)	DatosRx.L = L (UN)	DatosRx.L = L (UN)
F = 0dB	DatosRx.F = F (UN)	DatosRx.F = F (UN)	DatosRx.F = F (UN)
Pruido = (10-0) W	DatosRx.No = No W	DatosRx.No = No W	
RCS1 = (10-0) m <sup>2</sup>	DatosBlanco(1).RCS = RCS x mRCS m <sup>2</sup>	DatosBlanco(1).RCS = RCSx mRCS m <sup>2</sup>	DatosBlanco(1).RCS = RCS x mRCS m <sup>2</sup>
R1 = (0.95-0.13) Km	DatosBlanco(1).R = distancia x mR m	DatosBlanco(1).R = distancia x mR m	DatosBlanco(1).R = distancia x mR m
RCS2 = (1-0) m <sup>2</sup>	DatosBlanco(2).RCS = RCS x mRCS m <sup>2</sup>	DatosBlanco(2).RCS = RCS x mRCS m <sup>2</sup>	DatosBlanco(2).RCS = RCS x mRCS m <sup>2</sup>
R2 = (0.95-0.13) Km	DatosBlanco(2).R = distancia x mR m	DatosBlanco(2).R = distancia * mR m	DatosBlanco(2).R = distancia x mR m
		t = DatosTx.EjeX ms	
		kT = 4x10 <sup>-21</sup> (UN)	kT= 4x10 <sup>-21</sup> (UN)

**Tabla 0-1 Parámetros para el usuario y programador.**