



# 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 de onda continua*

### Grado en Ingeniería Mecánica

**ALUMNO:** M<sup>a</sup> Concepción Bugatto del Águila

**DIRECTOR:** 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 de onda continua*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General / Infantería de Marina

Universida<sub>de</sub>Vigo



## **RESUMEN**

En el presente trabajo de fin de grado (TFG), se desarrollarán los aspectos fundamentales para entender de una forma mas detallada los conocimientos teórico prácticos necesarios de un radar de onda continua modulado en frecuencia. El usuario será capaz de, mediante una plataforma interactiva, aplicar los conocimientos fundamentales de cualquier radar de onda continua. Para ellos se ha utilizado un software de lenguaje de alto nivel y en un entorno interactivo utilizado por millones de ingenieros y científicos en todo el mundo: *MATLAB*.

El objetivo pues, no es otro que desarrollar específicamente una aplicación centrada en el funcionamiento de un radar, que cumpla con las características requeridas de este tipo de dispositivos, tan utilizados en unas Fuerzas Armadas modernas y tecnológicamente avanzadas.

Durante el trabajo se especifican los contenidos teóricos necesarios que se han desarrollado en la aplicación, cómo se han generado las señales, qué parámetros podemos modificar o simplemente los cálculos que realiza un radar de éstas características.

Se desarrolla así el trabajo con el objetivo de que el usuario sea capaz de entender, intuir y aprender el funcionamiento de este tipo de señales y como complemento didáctico para un mejor entendimiento de este tipo de radares.

## **PALABRAS CLAVE**

Modulación lineal en frecuencia, Radar onda continua, Efecto Doppler, Chirp, Ambigüedad en distancia



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Paula Gómez Pérez el apoyo prestado durante este tiempo y por los conocimientos teóricos y prácticos transmitidos para la realización de este trabajo.

Agradezco a mi familia el haberme animado y apoyado incondicionalmente durante este período en la Escuela Naval Militar.



## CONTENIDO

Contenido .....	1
Índice de Figuras .....	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos.....	7
1.1 Introducción .....	7
1.2 Objetivos .....	8
1.3 Estructura .....	8
2 Fundamentos de Radar .....	9
2.1 Conceptos básicos de radar .....	9
2.1.1 Ecuación radar básica .....	11
2.1.2 Firma radar o RCS .....	11
2.1.3 Distancia máxima no ambigua.....	13
2.1.4 Resolución en distancia .....	15
2.2 Radares de Onda Continua.....	16
2.2.1. Introducción al concepto de Onda continua .....	16
2.2.2. Efecto Doppler y bancos de filtros Doppler .....	17
2.2.3. Velocidades ciegas.....	18
2.2.4. Modulación lineal en frecuencia (LFM o Chirp).....	19
2.2.5. Ecuación alcance radar de Onda Continua .....	23
2.2.6. Clutter y sistemas MTI .....	23
3. Aplicación Desarrollada .....	25
3.1. Introducción .....	25
3.2. Manual del Usuario .....	25
3.2.1. Interfaz de usuario .....	25
3.2.2. Introducción de los datos del Transmisor.....	28
3.2.3. Introducción de los datos del Receptor.....	29
3.2.4. Introducción de los datos del blanco .....	30
3.2.5. Representaciones gráficas.....	31
3.2.6. Presentación de cálculos y observaciones .....	33
3.3. Detalles de implementación .....	37
3.3.1. Generación de la señal de Chirp en Matlab .....	37
3.3.2. Generación de blancos y cálculo de la señal recibida.....	38
4. Resultados de la Aplicación .....	41

4.1. Detección simple de blancos.....	41
4.2. Estimación de la velocidad del blanco.....	43
4.3. Discriminación entre blancos contiguos .....	44
5. Conclusiones y líneas futuras .....	47
5.1. Conclusiones .....	47
5.2. Líneas futuras.....	47
6. Bibliografía.....	49
Anexo I: Variables utilizadas y Rango de cada una de ellas.....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Radar Cross Section Regimes [2].....	12
Figura 2-2 Ilustración de la RCS en función de el ángulo [5] .....	13
Figura 2-3 Tren de pulsos transmisores y receptores [6].....	14
Figura 2-4 Ambigüedad en Distancia [6].....	15
Figura 2-5 (a) Dos blancos sin diferenciar (b) Dos blancos diferenciados [6] .....	16
Figura 2-6 Conjunto de ondas continuas [7].....	16
Figura 2-7 Geometría de el radar y el blanco [4].....	17
Figura 2-8 Banco de filtros doppler para $N=8$ [4] .....	18
Figura 2-9 Señal de Chirp, cuya frecuencia aumenta linealmente con el tiempo .....	20
Figura 2-10 Señales triangulares LFM del transmisor, receptor y frecuencia de batido de un blanco estacionario [5].....	20
Figura 2-11 Señal típicamente LMF. (a) chirp-ascendente (up); (b) chirp-descendente (down) [5].....	22
Figura 2-12 Transmisor y receptor de señales LFM y frecuencia de batido, de un blanco en movimiento [5].....	22
Figura 3-1 Entorno gráfico principal de la aplicación .....	26
Figura 3-2 Entorno gráfico principal cuando interactúa el usuario .....	27
Figura 3-3 Datos transmisor.....	28
Figura 3-4 Datos receptor .....	29
Figura 3-5 Relación SNR en función de la $P_d$ y $P_{fa}$ [2].....	29
Figura 3-6 Datos de los blancos.....	31
Figura 3-7 Figura 1 representación de las tres señales Chirp .....	32
Figura 3-8 Figura 2 señales en forma de dientes de sierra.....	32
Figura 3-9 Figura 3 Suma de las señales recibidas con ruido.....	33
Figura 3-10 Representación de todas las figuras .....	33
Figura 3-11 Presentación de cálculos y observaciones.....	34
Figura 3-12 Presentación advertencias .....	34
Figura 3-13 Representación de el cálculo de $fd$ .....	35
Figura 3-14 Representación de el cálculo de $dt$ para $R_{blanco} < R_{max}$ no amiga .....	36
Figura 3-15 Representación de el cálculo de $dt$ para $R_{blanco} > R_{max}$ no amiga .....	36
Figura 3-16 Modulación lineal en Frecuencia .....	37
Figura 3-17 Señal de tres chirp con respecto a la potencia y la frecuencia .....	38
Figura 3-18 Señal transmitida y señales recibida correspondiente a un blanco.....	39
Figura 3-19 Representación de la suma de ambas señales.....	40

Figura 4-1 Ejemplo detección simple blancos .....	41
Figura 4-2 Ejemplo detección simple de blancos .....	42
Figura 4-3 Ejemplo Cálculo de velocidades de blanco .....	43
Figura 4-4 Ejemplo Cálculo de velocidades de blanco .....	44
Figura 4-5 Ejemplo diferenciación entre blancos contiguos.....	45
Figura 4-6 Ejemplo diferenciación entre blancos contiguos.....	45

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Bandas de frecuencia de trabajo de los sistemas radar [2] .....	10
Tabla 3-1 Datos del transmisor .....	28
Tabla 3-2 Datos del receptor .....	30
Tabla 3-3 Datos de los blancos .....	31



# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Introducción

Es de sobra conocido la importancia del radar hoy en día como herramienta para vigilancia, y seguimiento de blancos a bordo de una plataforma militar. También es de interés en la vida civil pues proporcionan una valiosa ayuda para, por ejemplo, prevenir colisiones en aeropuertos o para predicciones u observaciones meteorológicas.

En concreto, en las Fuerzas Armadas, el manejo de un sistema radar cobra vital importancia pues existe una gran cantidad de radares militares como el *SPY-1D*, *TRS-3D* o *SPS-67*.

Por ello es de vital importancia que todos aquellas personas que tengan la responsabilidad de manejar un radar conozcan: el alcance que tiene, los parámetros que lo caracterizan, o el impacto que tiene como herramienta a bordo de una plataforma.

La aplicación desarrollada en este trabajo de fin de grado (TFG), pretende mostrar de una manera visual e intuitiva el funcionamiento de un radar de onda continua modulado en frecuencia. El objetivo es obtener una herramienta docente para que el usuario compruebe y entienda cómo afecta al radar cada una de las variables que lo componen, como el ancho de banda, la reflectividad del blanco, la distancia a la que se encuentra el blanco o la propia ganancia de la antena, entre otras.

En este trabajo pretende establecer la estructura software básica de un radar de onda continua modulado en frecuencia, partiendo de la generación básica de las señales transmitidas hasta la aplicación de una modulación lineal en frecuencia simple (tipo Chirp).

Para desarrollar la aplicación se ha seleccionado *Matlab*, por su versatilidad a la hora de programar. Con el objeto de usar la aplicación para fines didácticos, se ha desarrollado una interfaz gráfica (*Guided User Interface*, GUI) que la hace más intuitiva.

## 1.2 Objetivos

En este trabajo pretendemos crear la estructura de un software de entrenamiento para aprendizaje de los conceptos básicos de radares de onda continua, basado en *Matlab*.

El objetivo de este proyecto es que, un usuario (alumno) que no tenga conocimientos de básicos de radar, pueda entenderlo con nuestra aplicación. Se presentan en el proyecto los conceptos de detección de blancos, extracción de velocidades de los mismos, conceptos de distancia máxima no ambigua, resolución en distancia o distancia mínima así como todos los parámetros que están implicados en la ecuación radar.

En la parte de procesado de la señal, el proyecto persigue generar un entorno intuitivo de aprendizaje, para lo cual se ha generado un interfaz gráfico de forma que el usuario pueda distinguir visualmente las señales transmitidas de las recibidas por el radar y, así, pueda contrastar los datos calculados con las representaciones gráficas.

## 1.3 Estructura

En esta memoria se recoge todo el trabajo llevado a cabo, y se estructura de la siguiente forma:

El capítulo 2 contiene un repaso en profundidad de los conceptos de sistemas radar que hemos usado en la aplicación.

A continuación, en el capítulo 3 se ha desarrollado el manual del usuario de la aplicación, donde se especifican el rango de las variables implicadas en nuestro radar.

El capítulo 4 contiene una serie de ejemplos que permitan a un usuario interpretar los datos obtenidos que se representan por pantalla.

Para finalizar, el último capítulo se desarrolla las conclusiones del trabajo, así como una serie de líneas futuras que permitan la continuidad del mismo.

## 2 FUNDAMENTOS DE RADAR

### 2.1 Conceptos básicos de radar

La palabra “RADAR” proviene de la expresión inglesa *RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging, es decir, detección y medición de distancias por ondas de radio. Nos proporciona información de la marcación u distancia de un buque, tanto de día como de noche. Asimismo, constituye un elemento invaluable a la hora de determinar riesgos de colisión y maniobrar en cumplimiento del *Reglamento Internacional para Prevenir los Abordajes en la mar* [1], principalmente en condiciones de mucho tráfico.

En líneas generales, un sistema radar genera una onda electromagnética, quedando a la escucha del eco producido por el blanco, la cual utiliza para poder detectar al mismo, así como para extraer toda la información posible de dicho blanco. El pulso de ondas electromagnéticas producido es radiado por la antena, la cual lo dirige en una determinada dirección. Al encontrar un objeto en su camino parte del pulso se refleja volviendo a la antena. El radar calcula la distancia al blanco midiendo el tiempo que tarda la señal desde el instante de la emisión hasta el momento de la recepción. Es decir, es un sistema que utiliza radiaciones electromagnéticas reflejadas por un objeto para determinar su localización y su distancia.

Los radares se clasifican en función de una serie de aspectos básicos [2]:

a) Según el número de antenas:

- **Monoestático:** Son aquellos sistemas que disponen de una única antena para transmisión y recepción.
- **Biestático:** Son aquellos sistemas que disponen de dos antenas independientes, una para transmisión y otra para recepción, en un mismo o en diferente emplazamientos.
- **Multiestático:** Combina la información recibida por varias antenas.

b) Según la forma de la onda:

- **Radares pulsados (*Pulsed Radars, PR*):** Es el tipo más común de radares. Este tipo de sistemas utilizan un tren de pulsos de potencia elevada como señal transmitida (con o sin modular), y conforman el tipo más común de radares. Suelen necesitar potencias de kilovatios lo cual los hace relativamente grandes.
- **Radares de Onda continua (*Continuous Wave Radars, CW*):** Estos radares emiten energía electromagnética de forma continua, por lo que resulta imprescindible disponer de una antena para transmisión y otra para recepción, independiente de la primera. Los radares de CW no modulados pueden medir la velocidad del blanco (efecto Doppler) y

la posición angular. La distancia al blanco no se puede extraer sin utilizar algún tipo de modulación, siguiendo los mismos principios de funcionamiento que en el radar pulsado.

c) Según su finalidad:

- **Radar de seguimiento:** Es capaz de seguir el movimiento de un blanco.
- **Radar de búsqueda:** Explora todo el espacio, o un sector de él, mostrando todos los blancos que aparecen en el área de cobertura.
- **Radares multifunción:** Son aquellos sistemas con capacidad para funcionar de ambos modos, seguimiento y búsqueda.
- **Radar meteorológico:** Observación y predicción de fenómenos naturales.

Por otra parte, la frecuencia de trabajo será un factor determinante en la resolución del sistema radar. Se distinguen diferentes bandas de trabajo, que se muestran en la **Tabla 2-1** [2].

Nombre de la banda	Frecuencias (GHz)	Longitud de onda ( $\lambda = c/f$ )
HF	0,003-0,03	10-100 m
P	< 0,3	> 1 m
VHF	0,05-0,33	0,9-6 m
UHF	0,3-1	0,3-1 m
L	1-2	15-30 cm
S	2-4	7,5-15 cm
C	4-8	3,75-7,5 cm
X	8-12	2,5-3,75 cm
Ku	12-18	1,67-2,5 cm
K	18-27	1,11-1,67 cm
Ka	27-40	0,75- 1,11 cm
mm	40-300	7,5-1 mm
Q	40-60	7,5-5 mm
V	50-75	6-0,4 mm
E	60-90	6-3,33 mm
W	75-110	4-2,75 mm

**Tabla 2-1 Bandas de frecuencia de trabajo de los sistemas radar [2]**

### 2.1.1 Ecuación radar básica

La ecuación radar es la base fundamental de la teoría de radares y representa una relación entre la potencia transmitida y la potencia recibida, en función de la distancia estimada hasta el contacto.

La ecuación del radar simplificada [3] expresa el alcance máximo del radar en función de los parámetros del radar y de la adquisición de la sección radar cuando el radar está limitado por el ruido recibido.

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

Donde:

$P_t$  = La potencia transmitida, expresada en vatios (W)

$G$  = Ganancia de la antena, expresada en unidades naturales

$A_e$  = Apertura efectiva de la antena, expresada en metros cuadrados ( $m^2$ )

$\sigma$  = Es la firma radar del blanco, denominada Sección Equivalente Radar, o *Radar Cross Section* (RCS) en inglés, expresada en  $m^2$

$S_{min}$  = Es la potencia de señal mínima detectable por el receptor, expresada en W

Excepto la sección equivalente radar, que es una característica propia del blanco, los parámetros de la Ec. 1 dependen del diseño de cada sistema en concreto. Si se desean obtener grandes alcances, la potencia transmitida debe ser alta, la energía radiada debe estar concentrada en un haz estrecho (es decir, la ganancia transmitida debe ser alta), el eco de la energía debería ser recibida por una antena de gran apertura (es decir, una antena receptora de ganancia elevada), y el receptor debería ser capaz de detectar señales débiles.

En la práctica, sin embargo, la ecuación radar simple no es adecuada para predecir el resultado de la distancia de los radares actuales. Los inconvenientes de dicha ecuación, como se describe en [4], se deben a:

- 1) Las interferencias naturales de la señal mínima detectable.
- 2) Las fluctuaciones en tiempo de la RCS del blanco.
- 3) Las pérdidas experimentadas por el sistema radar.
- 4) Los efectos de la propagación causadas por la superficie de la tierra y la atmósfera.

Las interferencias naturales de ruido y la detección de la sección radar equivalente requiere que el máximo alcance radar sea dado en términos de probabilidad, en vez de en un solo número. Por tanto, las especificaciones del alcance deben estar incluidas en la probabilidad de que el radar detecte un blanco específico en una distancia concreta con una probabilidad específica, realizando una falsa detección cuando no existen blancos en un eco ya recibido. El alcance del radar, entonces, estará en función de la probabilidad de detección,  $P_d$ , y de la probabilidad de falsa alarma,  $P_{fa}$ .

### 2.1.2 Firma radar o RCS

La RCS (sección equivalente radar) de un blanco es la cantidad de potencia que re-radia un blanco en la dirección de vuelta al radar. Normalmente se representa como  $\sigma$ , y se define como el cociente

entre la densidad de la potencia incidente sobre el blanco ( $W/m^2$ ) y la potencia rerradiada por éste de vuelta al radar ( $W$ ). Por ello, se mide en  $m^2$  y tiene dimensiones de área.

No es un parámetro constante, sino que depende de la frecuencia, del ángulo de incidencia, la polarización, de la forma del blanco e incluso del material del mismo.

Con respecto a la frecuencia, la RCS de un blanco variará dependiendo de la región en que nos encontremos en cada momento. Se distinguen entonces tres zonas diferentes [2]:

- **Región Rayleigh:** Es la región en la cual el tamaño del blanco es mucho menor que la longitud de onda  $\lambda$ , y además la RCS apenas varía con el ángulo de observación y varía en el orden de frecuencia a la cuarta,  $f^4$ .
- **Región de Resonancia:** En esta región, la longitud de onda,  $\lambda$ , es comparable con el tamaño del blanco. La RCS varía con la frecuencia (hasta  $\pm 10dB$ ) y con el ángulo de observación.
- **Región óptica:** Es la región en la que el tamaño del blanco es grande en comparación con la longitud de la onda,  $\lambda$ . La RCS la combinación coherente de la RCS y de los dispersores individuales. También cambia con el ángulo de observación.

La Figura 2-1 [2] ilustra cada una de las regiones mencionadas, mientras que la Figura 2-2 [5] muestra la dependencia de la RCS con el ángulo de incidencia (*aspect angle*, en inglés).

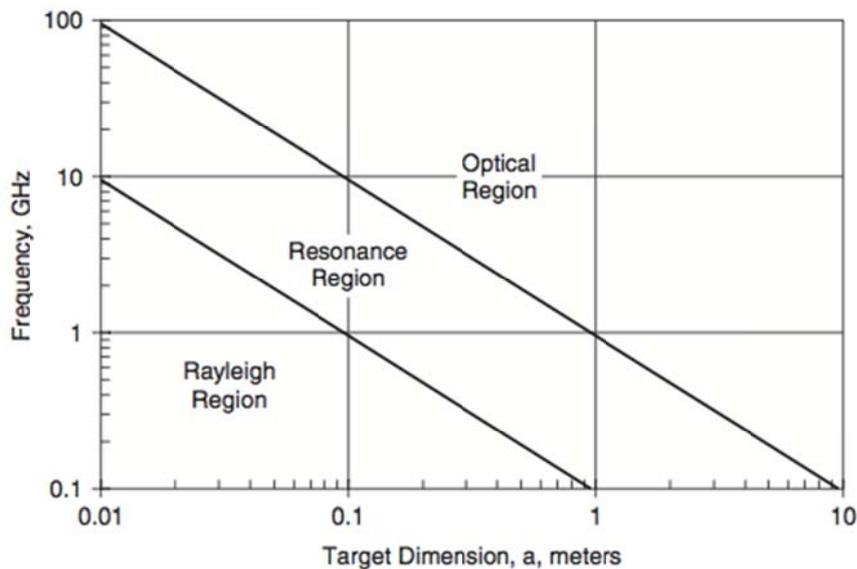
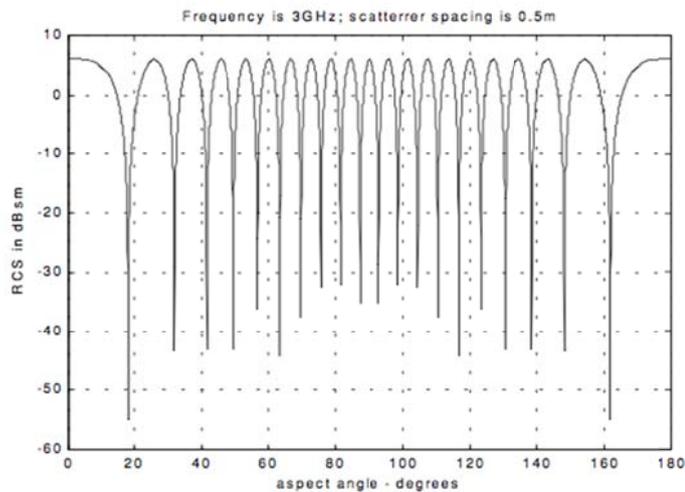


Figura 2-1 Radar Cross Section Regimes [2]



**Figura 2-2 Ilustración de la RCS en función de el ángulo [5]**

### 2.1.3 Distancia máxima no ambigua

Como ya hemos visto, el radar calcula la distancia al blanco midiendo el tiempo que tarda la señal desde el instante de la emisión hasta el momento de la recepción:

$$v = \frac{R}{t} \tag{Ec. 2}$$

Donde  $v$  es la velocidad de propagación de la onda electromagnético en el medio en el que se encuentre,  $R$  es la distancia recorrida por el pulso (del inglés *Range*) y  $t$  el tiempo empleado en recorrer dicha trayectoria.

En el vacío, la velocidad de la onda viene dada por la velocidad de la luz,  $c$ , cuyo valor conocemos como  $3 \times 10^8$  m/s. Dado que la señal radar recorre dos veces la distancia entre el transmisor y el blanco (dado que va hacia el blanco, rebota y vuelve), la Ec. 2 se puede reescribir como:

$$c = \frac{2R}{t} \tag{Ec. 3}$$

En general, los pulsos de radar transmitidos y recibidos son un tren de pulsos, como vemos en la figura 2-3 [6]. El periodo entre pulso es  $T$  (o IPP, acrónimo del término inglés *InterPulse Period*), y el ancho de pulso es  $\tau$ . El IPP normalmente se refiere al intervalo de repetición de pulso, más comúnmente conocido como intervalo de repetición de pulsos, o PRI por sus siglas en inglés (*Pulse Repetition Interval*). La inversa de el PRI es el PRF, o *Pulse Repetition Frequency*, dado por la Ec. 4:

$$PRF = \frac{1}{PRI} = \frac{1}{T} \tag{Ec. 4}$$

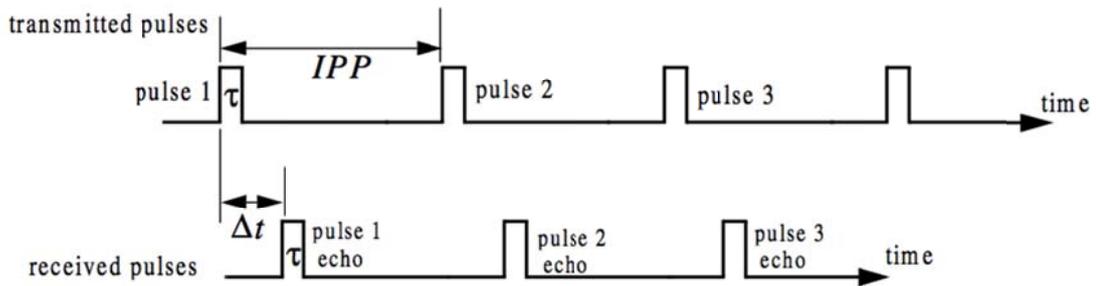


Figura 2-3 Tren de pulsos transmisores y receptores [6]

Durante cada PRI el radar radia energía solamente durante  $\tau$  segundos, y queda a la escucha de ecos recibidos de potenciales blancos durante el resto del PRI. El ciclo de trabajo (o *duty cycle* en inglés) del transmisor,  $d_t$ , se define como  $d_t = \tau/T$  y representa el porcentaje de tiempo dentro de un periodo en el que el radar esta transmitiendo. La potencia media transmitida es, por tanto:

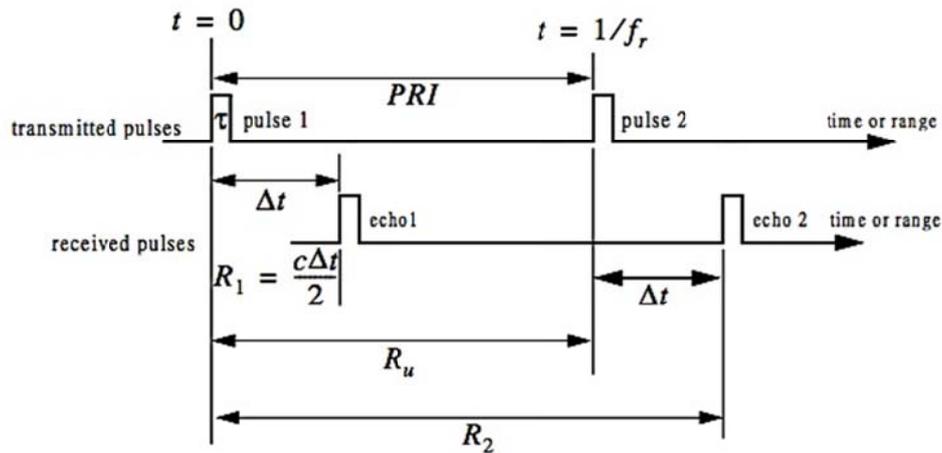
$$P_{av} = P_t \times d_t \quad \text{Ec. 5}$$

Donde  $P_t$  es la potencia de pico. Esto implica que la onda tiene una energía que viene dada por la Ec. 6:

$$E_p = \tau P_t = P_{av}T = \frac{P_{av}}{f_r} \quad \text{Ec. 6}$$

La duración del PRI determinará la distancia máxima de alcance de un radar, a la hora de diferenciar blancos en el horizonte sin ninguna ambigüedad. Este hecho se ilustra en la Figura 2-4 [6], donde el eco 1 representa el retorno radar de un blanco de distancia  $R_1 = c\Delta t/2$  de acuerdo con el pulso 1. Sin embargo, el eco 2 puede representar dos blancos diferentes: o bien un blanco de distancia  $R_2 = c\Delta t/2$  de acuerdo con el pulso 2, o bien puede ser el regreso de un blanco mas lejano a una distancia,  $R_2$  de acuerdo con el primer pulso. En este caso, las distancias de detección vendrán dadas por:

$$R_2 = \frac{c\Delta t}{2} \quad \text{ó} \quad R_2 = \frac{c(T+\Delta t)}{2} \quad \text{Ec. 7}$$



**Figura 2-4 Ambigüedad en Distancia [6]**

El hecho de que existan dos posibles distancias para un mismo blanco, es lo que se denomina *ambigüedad en distancia*. Está claro que la ambigüedad en distancia está asociada con el eco 2. Por lo tanto, una vez que el pulso se haya transmitido, el radar debe esperar suficiente espacio de tiempo el regreso de blancos, lo que da lugar a una distancia máxima, de forma que cualquier eco esté de vuelta antes de que el siguiente pulso sea emitido. Por tanto, la distancia máxima no ambigua debe corresponder con la mitad del PRI.

Despejando la distancia y en el caso de que el tiempo sea igual al intervalo de repetición de pulso (PRI), se deduce la distancia al blanco, en función del tiempo que ha tardado la señal radar en llegar de vuelta a nuestro sistema:

$$R = \frac{cPRI}{2} \tag{Ec. 8}$$

### 2.1.4 Resolución en distancia

La resolución en distancia es la capacidad del radar para distinguir entre blancos próximos en distancia. A diferencia del caso anterior, depende del ancho del pulso,  $\tau$ .

$$R = \frac{c\Delta t}{2} \tag{Ec. 9}$$

Donde  $R$  se mide en metros y  $\Delta t$  en segundos. El factor  $\frac{1}{2}$  se necesita para medir el tiempo de retraso de la señal entre la ida y la vuelta.

La resolución en distancia, denominada comúnmente como  $\Delta R$ , y definida en la Ec. 10, es una medida de longitud e implica la capacidad de detectar blancos que están muy próximos unos a otros como objetos distintos. El sistema radar está diseñado para operar entre una distancia mínima,  $R_{min}$ , que viene dada por  $\Delta R$  y una distancia máxima,  $R_{max}$ , que viene dada por la distancia máxima no ambigua.

$$\Delta R = \frac{c\tau}{2} \tag{Ec. 10}$$

El tamaño del pulso,  $\tau$ , afecta al radar en la medida en que, si es menor distinguirá mejor dos blancos cercanos, pues el receptor del radar recibirá dos pulsos perfectamente diferenciados (Figura 2-5b). Sin embargo si el tamaño es mayor el receptor puede recibir los dos pulsos seguidos y no es capaz de distinguir uno de otro. Este efecto se muestra en las Figura 2-5 (a) y (b) [6].

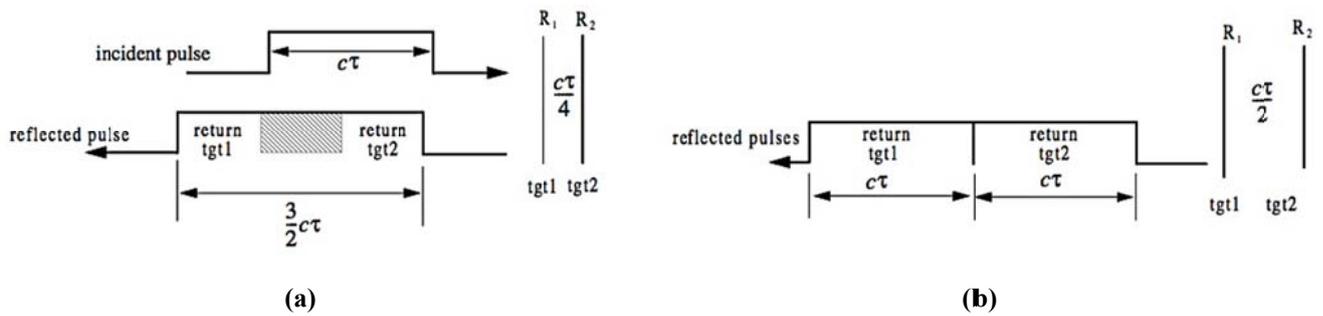


Figura 2-5 (a) Dos blancos sin diferenciar (b) Dos blancos diferenciados [6]

## 2.2 Radares de Onda Continua

### 2.2.1. Introducción al concepto de Onda continua

Los radares de onda continua (CW) utilizan ondas continuas, típicamente sinusoidales, cuya particularidad es la capacidad para la realización de un transmisión y recepción simultánea, sin tiempos de escucha como en el caso de los radares pulsados. Para evitar que se interrumpa o se solape la energía de emisión de un radar de onda continua con la energía recibida, se utilizan dos antenas, una de transmisión y otra de recepción.

Para el trabajo que nos ocupa, consideramos ondas puramente senoidales, expresadas matemáticamente como  $sen(2\pi ft)$ , donde  $f$  representa la frecuencia y  $t$  el tiempo. Para este tipo de onda, la señal de un blanco estacionario o el clutter, cuyo concepto desarrollamos en posteriores apartados, se concentran en una frecuencia inicial  $f_0=0$ . Sin embargo la frecuencia para las ondas de blancos en móviles es  $fd=f\neq 0$  es la frecuencia Doppler. Así, midiendo la diferencia de frecuencias entre la frecuencia de las señal transmitida y la señal recibida de un blanco, se puede extraer con precisión la velocidad radial de dicho blanco así como si se acerca o se aleja a nuestro radar. Debido a la naturaleza de la emisión continua no es posible medir dicha velocidad sin modificaciones en las operaciones del radar y la forma de la onda, como veremos en la modulación lineal en frecuencia.

La figura 2.6. [7] muestra las clases de ondas continuas. En este TFG, hemos usado una onda continua modulada en frecuencia, detallada como FM/CW en la figura.



Figura 2-6 Conjunto de ondas continuas [7]

### 2.2.2. Efecto Doppler y bancos de filtros Doppler

El efecto Doppler se define como el cambio aparente de frecuencia de una onda producida por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador. Es el mismo efecto que se produce en el ejemplo de la sirena de una ambulancia acercándose o alejándose. Para el desarrollo de este trabajo, nos interesa el efecto Doppler como el cambio de frecuencia de las señales electromagnéticas que se propagan desde el radar al blanco en movimiento y regresan de vuelta al radar.

Para entender mejor este concepto, se define  $R$  como la distancia del radar al blanco. Teniendo en cuenta que nuestras señales electromagnéticas se propagan dos veces esa distancia  $R$ , es decir una de ida y otra de vuelta, se tomará como distancia  $2R$ . La longitud de onda se define como  $\lambda$ , a cada  $\lambda$  corresponde un cambio de fase de  $2\pi$  radianes. La fase total se define como:

$$\phi = 2\pi \frac{2R}{\lambda} = 4\pi R/\lambda \quad \text{Ec. 11}$$

Si el blanco está en movimiento relativo con el radar, la distancia instantánea variará y también lo hará la fase. Tomando la Ec. 11 con respecto al tiempo, obtenemos la frecuencia angular:

$$W_d = \frac{d\phi}{dt} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dR}{dt} = \frac{4\pi vr}{\lambda} = 2\pi f_d \quad \text{Ec. 12}$$

Donde  $vr$  se define como la velocidad radial, o la media del cambio de la distancia con el tiempo, mientras que  $f_d$  es la frecuencia Doppler.

$$vr = \frac{dr}{dt} \quad \text{Ec. 13}$$

La Ec.12 se utiliza para el caso en que el blanco se mueva en dirección radial al radar, ya sea acercándose o alejándose. En el caso de que el blanco se mueva en una dirección diferente, como muestra la figura 2-7 [4], en el que  $\theta$  es el ángulo que forma el vector velocidad del blanco y la línea que une radar-blanco y  $vr = v\cos\theta$ , donde  $v$  es la velocidad o la magnitud del vector velocidad. La media de el cambio de  $\phi$  con el tiempo es la frecuencia angular  $w_d$  y  $f_d$  es la frecuencia doppler [4]:

$$f_d = \frac{2vr}{\lambda} = \frac{2f_t vr}{c} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde la frecuencia del radar es  $f_t = c/\lambda$ , y la velocidad de propagación  $c = 3 \times 10^8$ .

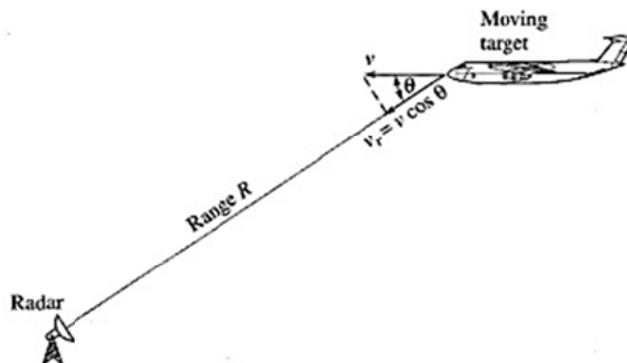


Figura 2-7 Geometría de el radar y el blanco [4]

Sin el efecto Doppler en los radares de onda continua (CW), las señales débiles de los ecos recibidos quedarían ocultas por la presencia de señales transmitidas mucho mayores. Puesto que, como hemos visto anteriormente, un radar de onda continua transmite mientras recibe, filtramos las frecuencias con el objeto de poder separar las señales recibidas (débiles) de las transmitidas.

Para filtrar usamos un banco de filtros Doppler, que se compone de varios filtros seguidos, como muestra la figura 2-8 [4].

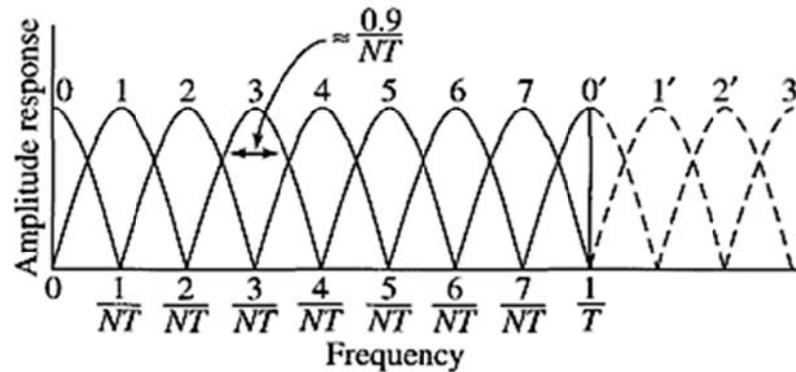


Figura 2-8 Banco de filtros doppler para N=8 [4]

Estos filtros tienen grandes ventajas como resumimos a continuación:

- 1) Se pueden separar múltiples blancos en movimiento. Puede ser muy útil cuando una de las señales recibidas de un blanco se encuentre oculta bajo la señal de un clutter en movimiento, como es el caso de la lluvia. Cuando el eco del clutter y el del blanco aparecen en distintos filtros, el clutter finalmente no interfiere con la detección del blanco en movimiento.
- 2) Pueden obtener una medida de la velocidad radial del blanco, filtrando las señales recibidas del blanco por desviación Doppler.
- 3) Además, la banda estrecha de un banco de filtros excluye más ruido que un sistema de indicador de movimientos del blanco (*Moving Target Indicator* o MTI) y proporciona integración coherente.
- 4) El banco de filtros Doppler puede ser implementado mediante el uso de la transformada de Fourier [8]. Ésta mide de la distancia de los blancos a partir de una serie de marcas en las ondas transmitidas y recibidas. Comparando dichas marcas entre el transmisor y el receptor podemos, tomar las diferencias entre ambas en tiempo, y finalmente somos capaces de extraer la distancia de los blancos.

### 2.2.3. Velocidades ciegas

Como se ha explicado anteriormente, a diferencia de los radares de pulsos, el transmisor emite ininterrumpidamente una portadora de onda continua (CW). Puede ser de frecuencia fija, o una portadora modulada en frecuencia (CW-FM) o en fase (CW-PM). Con los radares CW no se puede obtener distancia pero sí velocidad por desviación Doppler. Una aplicación común son los radares de tráfico.

Para obtener la distancia a un blanco, modulamos la portadora en frecuencia o en fase. Como el radar siempre transmite, puede haber problemas de acoplamiento entre el transmisor y el receptor que limitan el alcance. Podemos entenderlo como un radar pulsado donde el ciclo de trabajo es del 100%. La potencia de pico transmitida es igual a la potencia media, y para evitar acoplamientos, usamos dos antenas, una transmisora y la otra receptora.

Como vimos anteriormente respecto a los bancos de filtros Doppler, las marcas en las señales pueden ser moduladas por la onda transmisora, siendo el sistema más común la Modulación Lineal en Frecuencia (o LFM, por las siglas en inglés).

Los radares de onda continua (CW) solo miden la velocidad radial en dirección al radar cuando el blanco se aleja o se acerca. Un blanco con desplazamiento Doppler cero (que no se mueve respecto al receptor), no es detectado por lo que el radar está “ciego” a blancos que no tienen movimiento relativo al radar:

- Cuando el blanco está inmóvil,  $v_{blanco}=0$  m/s.
- Cuando el blanco se mueve tangencialmente al radar,  $v_{radial}=0$  m/s.
- Cuando el blanco se mueve a velocidades muy bajas,  $v_{blanco} \approx 0$  m/s.

A todas estas velocidades se las conoce como velocidades ciegas, dado que no tienen movimiento relativo con respecto al radar. Ocurren cuando la magnitud de nuestra señal es  $sen(\pi f_d T_p) = 0$ , y por lo tanto se darán siempre que  $\pi f_d T_p = 0, \pm \pi, \pm 2\pi, \pm 3\pi \dots$ . Donde  $f_d$  es la frecuencia Doppler y  $T_p$  es el intervalo de repetición de pulso [4]. Entonces la frecuencia Doppler vendrá dada por la expresión:

$$f_d = \frac{2vr}{\lambda} = \frac{n}{T_p} = n f_p \quad \text{Ec. 15}$$

Donde  $f_p$  es la frecuencia de repetición de pulso (PRI) y  $n$  es un número entero tal que  $n=0, 1, 2, 3 \dots$

La velocidad radial a la que se producen velocidades ciegas se calcula como:

$$vb = \frac{n\lambda}{2T_p} = \frac{n\lambda f_p}{2} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde  $vr$  ha sido sustituido por  $vb$  (*blind*).

En resumen, y a diferencia de los radares pulsados, los radares de onda continua distinguen los blancos no por sus pulsos, sino por su resolución en frecuencia y como particularidad, sufren las consecuencias de las velocidades ciegas de los blancos.

#### 2.2.4. Modulación lineal en frecuencia (LFM o Chirp)

En este apartado hablaremos de los radares de onda continua que están modulados linealmente en frecuencia (*Linear FM* o LFM). Estos radares son el tipo de radar que nos ocupa en este trabajo.

Dichos sistemas pueden variar su frecuencia de trabajo durante la medida, proporcionando la capacidad para medir distancias ya que contienen una referencia temporal. Como vimos anteriormente, mediante la diferencia de frecuencia y el efecto Doppler, la distancia de un blanco puede ser medida.

La LFM también se conoce como *Chirp*, debido a que un *chirp* es una señal cuya frecuencia aumenta o disminuye en función del tiempo. Un Chirp que varía linealmente con el tiempo se expresa según la ecuación de la recta,  $y=mx+n$ , en nuestro caso:

$$f(t) = f_0 + kt \quad \text{Ec. 17}$$

Donde  $f_0$  es la frecuencia inicial (o frecuencia de portadora, para  $t=0$ ) y  $k$  es la constante de Chirp que varía de la forma:

$$k = \frac{f_1 - f_0}{t_1} \quad \text{Ec. 18}$$

Siendo  $f_l$  la frecuencia final, y  $f_0$  la inicial en un instante determinado  $t_l$ . Podemos ver en la un ejemplo de la señal Chirp.

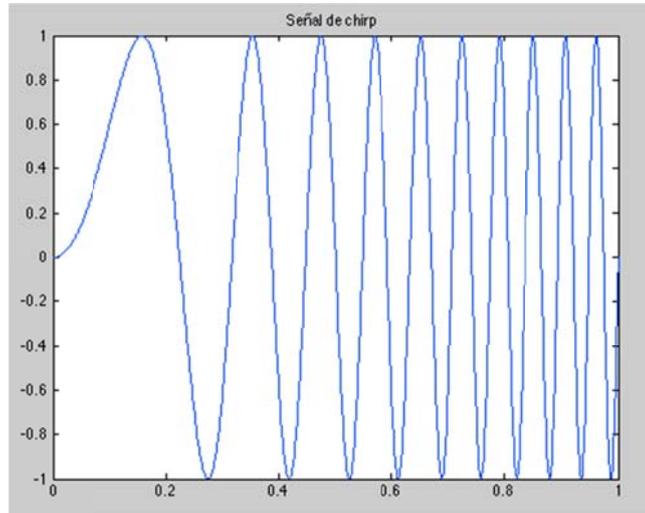


Figura 2-9 Señal de Chirp, cuya frecuencia aumenta linealmente con el tiempo

En la práctica, los radares LFM no pueden cambiar continuamente de dirección, y la periodicidad en la modulación está normalmente controlada. La figura 2-10 [5] muestra una forma de onda LFM triangular. La modulación no tiene por qué ser triangular, sino que puede tener la forma de un diente de sierra, como es el caso de la modulación aplicada a la senoide de la figura 2-9.

La línea discontinua de la figura 2-10, representa la señal recibida de un blanco estacionario (estático) a una distancia  $R$  del radar.

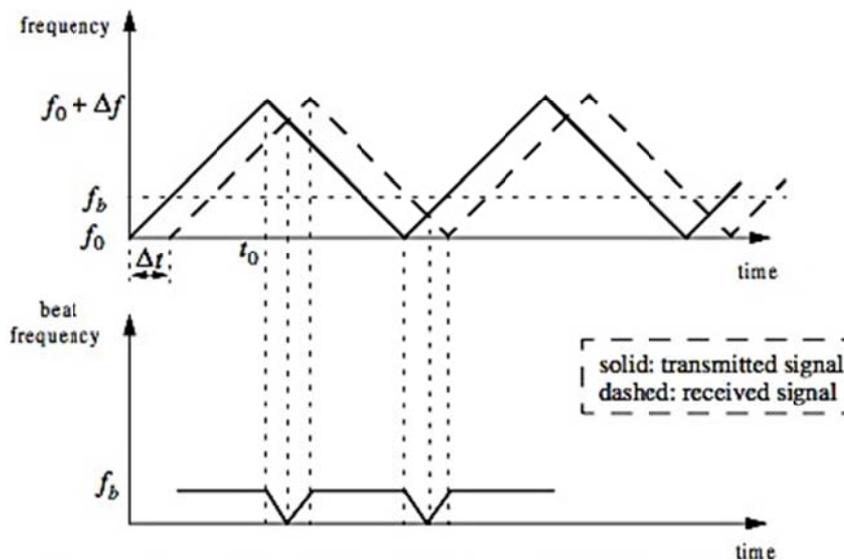


Figura 2-10 Señales triangulares LFM del transmisor, receptor y frecuencia de batido de un blanco estacionario [5]

En la práctica, la modulación en frecuencia  $fm$  se conoce como:

$$fm = \frac{1}{t_0} \tag{Ec. 19}$$

La media de los cambios de la frecuencia,  $f$ , viene dada por la expresión:

$$f = 2fm\Delta f \quad \text{Ec. 20}$$

Donde  $\Delta f$  es el barrido frecuencial o ancho de banda de la señal chirp. La frecuencia de batido se muestra también en la figura 2-10, como la diferencia entre la señal recibida y la señal transmitida. Es el parámetro que permite extraer la información sobre a qué distancia se encuentra un objeto estático iluminado por la señal chirp y su valor se puede calcular como:

$$Fb = \left(\frac{2R}{c}\right) f \quad \text{Ec. 21}$$

Por tanto, sustituyendo  $f$  de la ecuación de la Ec. 20 por el valor de la Ec.21, obtenemos [5]:

$$Fb = \frac{4Rfm\Delta f}{c} \quad \text{Ec.22}$$

O, también se expresa de la siguiente forma:

$$Fb = \frac{2R\Delta f}{cTchirp} \quad \text{Ec.23}$$

Se expresa así debido a que  $fm$  se puede expresar como:

$$Tchirp = \frac{\tau}{2} \quad \text{Ec.24}$$

$$\tau = \frac{1}{fm} \quad \text{Ec.25}$$

Y por tanto la distancia despejando de la Ec. 19, se obtiene como:

$$R = \frac{cTchirp}{2\Delta f} f_b \quad \text{Ec.26}$$

Consideremos ahora que existe un desplazamiento Doppler en frecuencia, es decir, consideremos blancos en movimiento (no estáticos). En este caso, la modulación lineal sufre una variación con respecto al patrón anterior, tal y como se muestra en la figura 2-12 [5], con la correspondiente frecuencia de batido. En este caso, la frecuencia de batido se define como:

$$F_b = f_{recibida} - f_{transmitida} \quad \text{Ec. 27}$$

En este caso, el efecto Doppler se sustrae de la frecuencia de batido durante la parte positiva de la pendiente. Alternativamente, los dos términos se añaden durante la parte de pendiente negativa. Esto quiere decir dependiendo si se acerca o se aleja al radar. Dejando la frecuencia de batido durante la parte positiva ascendente (*up*) y descendente (*down*) durante la parte negativa respectivamente [4] [5], como  $Fbu$  y  $Fbd$  muestra la figura 2-11:

$$Fbu = \frac{2R}{c} f - \frac{2R}{\lambda}$$

$$Fbd = \frac{2R}{c} f - \frac{2R}{\lambda}$$

Ec. 28

Donde R es la media de la distancia o la velocidad radial del blanco visto desde el radar.

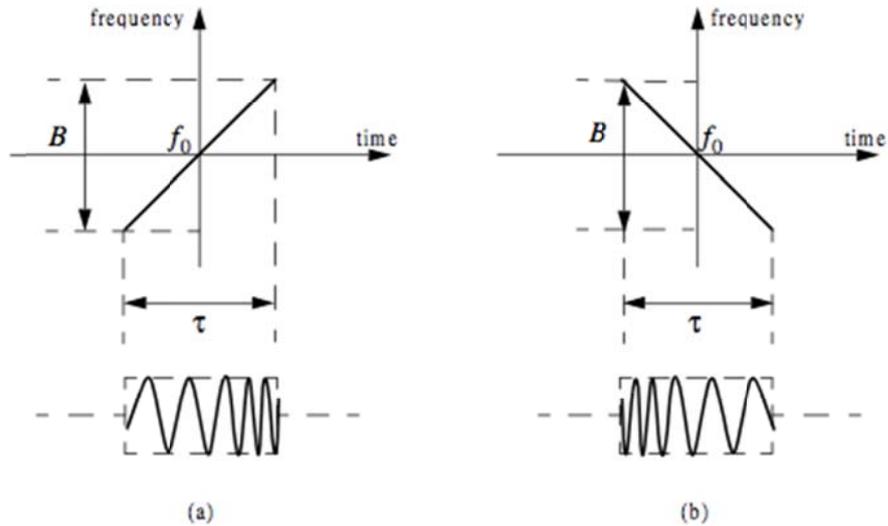


Figura 2-11 Señal típicamente LMF. (a) chirp-ascendente (up); (b) chirp-descendente (down) [5]

En la figura 2-12 [5] se representa la señal LMF transmitida (línea continua) y recibida de un blanco en movimiento (línea discontinua).

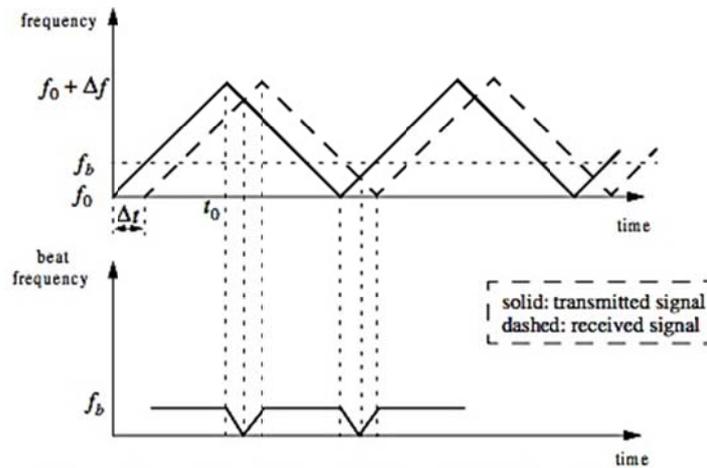


Figura 2-12 Transmisor y receptor de señales LMF y frecuencia de batido, de un blanco en movimiento [5]

Si unimos las dos fórmulas anteriores, resulta para blancos estáticos:

$$R = \frac{c}{4f} (f_{bu} + f_{bd})$$

Ec. 29

Y, por tanto, la velocidad se puede expresar como :

$$v = \frac{\lambda f_d}{2} \quad \text{Ec. 30}$$

### 2.2.5. Ecuación alcance radar de Onda Continua

La ecuación de alcance radar para radares CW es similar a la expuesta en el apartado 2.1.1. Sea, por tanto,  $P_t$  la potencia de pico transmitida,  $\tau$  el ancho de pulso,  $f_r$  el PRF,  $G_t$  la ganancia de la antena transmitida,  $G_r$  la ganancia de la antena recibida,  $\lambda$  la longitud de onda,  $\sigma$  la RCS del blanco,  $k$  la constante de Boltzman,  $T_e$  la temperatura de ruido efectiva,  $F$  la figura de ruido,  $L$  el total de las pérdidas y  $(SNR)_o$  el mínimo SNR requerido para realizar la detección al blanco. Esta ecuación se usa tanto para los radares pulsados como para radares de onda continua [5].

$$R = \left( \frac{P_t \tau f_r T_i G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_e F L (SNR)_o} \right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{Ec. 31}$$

En un radar de CW, los términos  $P_t \tau f_r$  deben ser sustituidos por la media de la potencia de onda continua  $P_{CW}$  [5]. También, el término  $T_i$  se refiere a el intervalo de tiempo hábil. Así que en nuestro caso, la fórmula final tendrá la siguiente expresión:

$$R = \left( \frac{P_{CW} T_i G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_e F L (SNR)_o} \right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{Ec. 32}$$

### 2.2.6. Clutter y sistemas MTI

A la hora de detectar un blanco, los radares tienen que enfrentarse con el ruido del eco recibido y con ruidos procedentes del ambiente, como la costa o el mar. El ruido del entorno se denomina clutter cuya principal característica es que trabaja a bajas frecuencias y . El clutter se puede reducir de varias formas. Una de ellas es mediante filtros. Dado que el clutter se moverá a velocidades nulas o casi nulas, el receptor será capaz de distinguirlo por el bajo (o nulo) desplazamiento Doppler que genera. Por tanto, es posible reducir mediante filtros el efecto del clutter permitiendo pasar ecos Doppler de blancos que tienen frecuencias y velocidades más altas que los del clutter.

El MTI es un filtro especial que distingue entre blancos estacionarios o a velocidades muy bajas de blancos más rápidos. Su propósito es suprimir las señales recibidas producidas por el clutter, y dejar pasar las señales de blancos móviles, con la menor degradación posible.

Para entender mejor su funcionamiento debemos saber que, primero el radar transmite dos barridos (el equivalente a dos pulsos en un radar pulsado) que impactan en un blanco móvil, clutter o blanco estacionario. Estos dos ecos son recibidos por el receptor, y acto seguido, el procesador MTI sustrae los dos ecos. Si ambas señales recibidas son idénticas (misma fase y amplitud) y regresan desde el mismo punto, ambas refracciones iguales se cancelan y por ello sabemos que es un clutter o blanco estacionario. Mientras que si ocurre el caso contrario, las señales recibidas varían en el tiempo, se producen fluctuaciones, obtenemos una determinada señal y por tanto se trata de un blanco móvil. Cuando un procesador MTI se combina con un procesador Doppler, nos referimos a un detector de blanco móvil (MTD) [7] y [2].



## 3. APLICACIÓN DESARROLLADA

### 3.1. Introducción

En este apartado se describirá, en líneas generales, la aplicación desarrollada, cómo funciona y las características. Se describen cada uno de los datos del radar y los datos que el usuario puede introducir o modificar. También se explica cómo se ha desarrollado el programa, las ecuaciones usadas y el procedimiento que hemos seguido para realizar nuestro radar en el software de *Matlab*.

El objetivo de este capítulo es el de introducir al manejo del programa a una persona sin conocimiento de fundamentos radar, ni de *Matlab*, así como dar las nociones básicas para ser capaz de interpretar los resultados obtenidos.

### 3.2. Manual del Usuario

Este apartado recoge toda la información que el usuario necesita conocer para utilizar el programa. A continuación detallaremos las partes en las se han dividido nuestra interfaz, los datos que el usuario tiene que introducir, porqué se han decidido utilizar esos datos y finalmente incluiremos algunos ejemplos que pueden servir de ayuda para interpretar los datos y las gráficas que aparecen por pantalla.

#### 3.2.1. Interfaz de usuario

Una vez arrancado el programa, se presentará por pantalla el entorno gráfico que muestra la figura 3-1. Dicha interfaz gráfica se ha dividido en cinco apartados principales:

- 1) **Representación gráficas:** En la parte izquierda de nuestro panel se representan tres figuras, que detallaremos posteriormente con más claridad. La primera de ellas muestra las señales *Chirp* transmitidas y recibidas en su forma sinusoidal, la segunda muestra la modulación LFM implementada en forma de diente de sierra característico, y la tercera muestra la suma de las señales recibidas, representando la señal a la entrada del transceptor radar.
- 2) **Transmisor:** El usuario podrá configurar en esta zona todos los datos relativos al transmisor, como potencia, PRI, etc.
- 3) **Receptor:** En esta parte del panel se pueden elegir los parámetros del receptor de nuestro radar (SNR mínima en recepción, pérdidas,...).
- 4) **Blanco1:** Esta opción permite seleccionar los parámetros de nuestro blanco, como la RCS, la distancia a la que se encuentra del radar y la velocidad del mismo.

- 5) **Blanco2:** De forma análoga al Blanco 1, el usuario puede seleccionar un segundo blanco, para poder ver el impacto que esto tiene en la modulación en frecuencia. Se podrá habilitar (o no) este blanco mediante el un *checkbox* al cual etiquetado como *Habilitar*. Una vez introducido, se deberán configurar sus parámetros, igual que en el caso anterior (Blanco 1).
- 6) **Cálculos y observaciones:** Por último, esta parte del panel muestra los cálculos que se derivan de las características del radar (como distancia máxima no ambigua y resolución en distancia), así como los cálculos del primer blanco y/o del segundo blanco (distancia máxima a la que son detectables, velocidad estimada...). Adicionalmente, la sección de **Observaciones** presenta una serie de advertencias para cada uno de los blancos, cuando, por ejemplo, no puedan ser detectados por nuestro radar, indicando el porqué de cada caso.

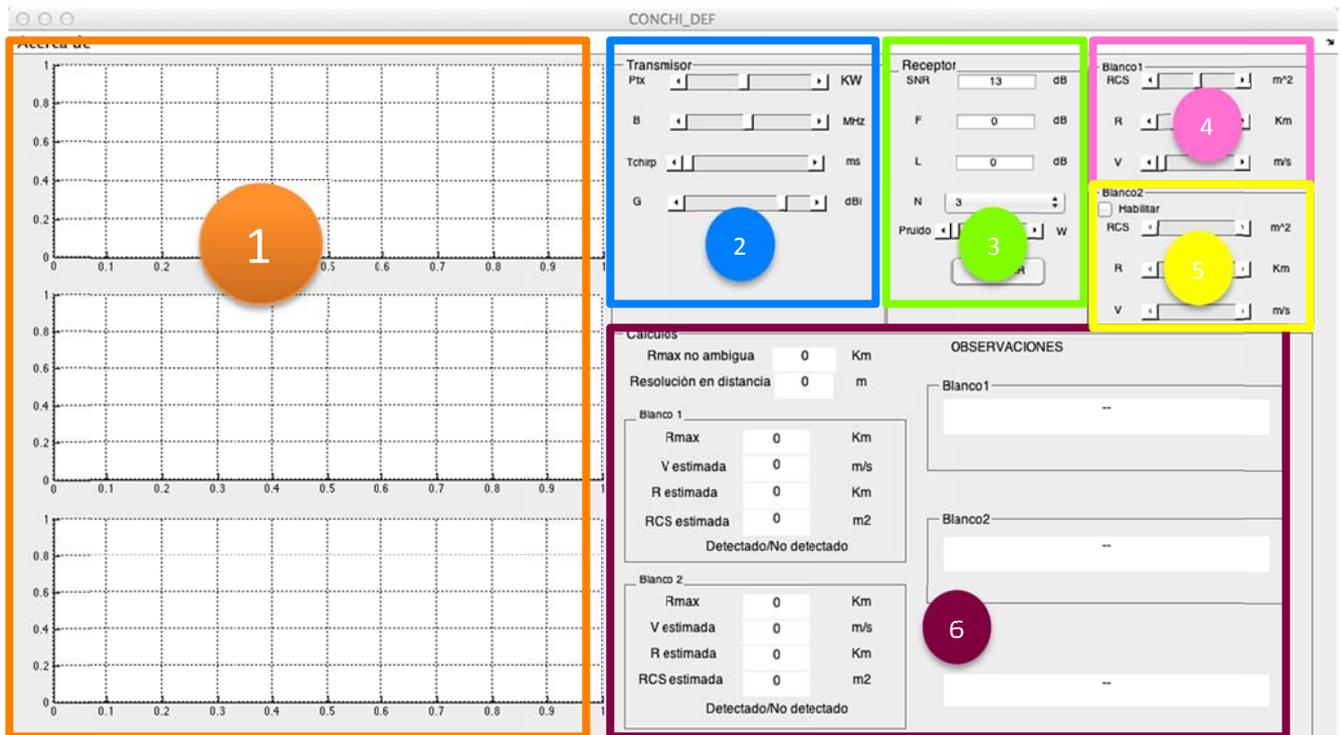


Figura 3-1 Entorno gráfico principal de la aplicación

A continuación explicaremos de forma general como funciona nuestro radar y obtener resultados como muestra la figura 3-2. Cuando el usuario desee lanzar una simulación, lo primero que tendrá que hacer será configurar los datos del transmisor según se indica en (2). Una vez introducida la configuración inicial, se deberán insertar los datos del receptor (3) y del blanco 1 (4). Cualquier dato de los introducidos en la aplicación puede ser modificado durante la simulación, con el fin de obtener distintos resultados. Una vez introducidos los datos deseados, pulsaremos el botón *Aceptar* (3).

Cada vez que el usuario modifique un dato debe volver a pulsar dicho botón. Si no es así, el radar no refrescará dichos parámetros y la gráfica se mantendrá inalterable. Finalmente, en (1) se muestran por pantalla diferentes gráficas:

- a) En la primera figura se representa la señal transmitida con respecto a la potencia, a la que se le superpone la señal recibida correspondiente al primer blanco (y segundo blanco, en caso de haberlo habilitado). Todas estas señales muestran el Chirp de la señal transmitida y recibida, tratándolas como señales independientes. De esta forma, el usuario puede apreciar los efectos que tienen sobre cada una de ellas, los distintos parámetros que se han introducido por pantalla.

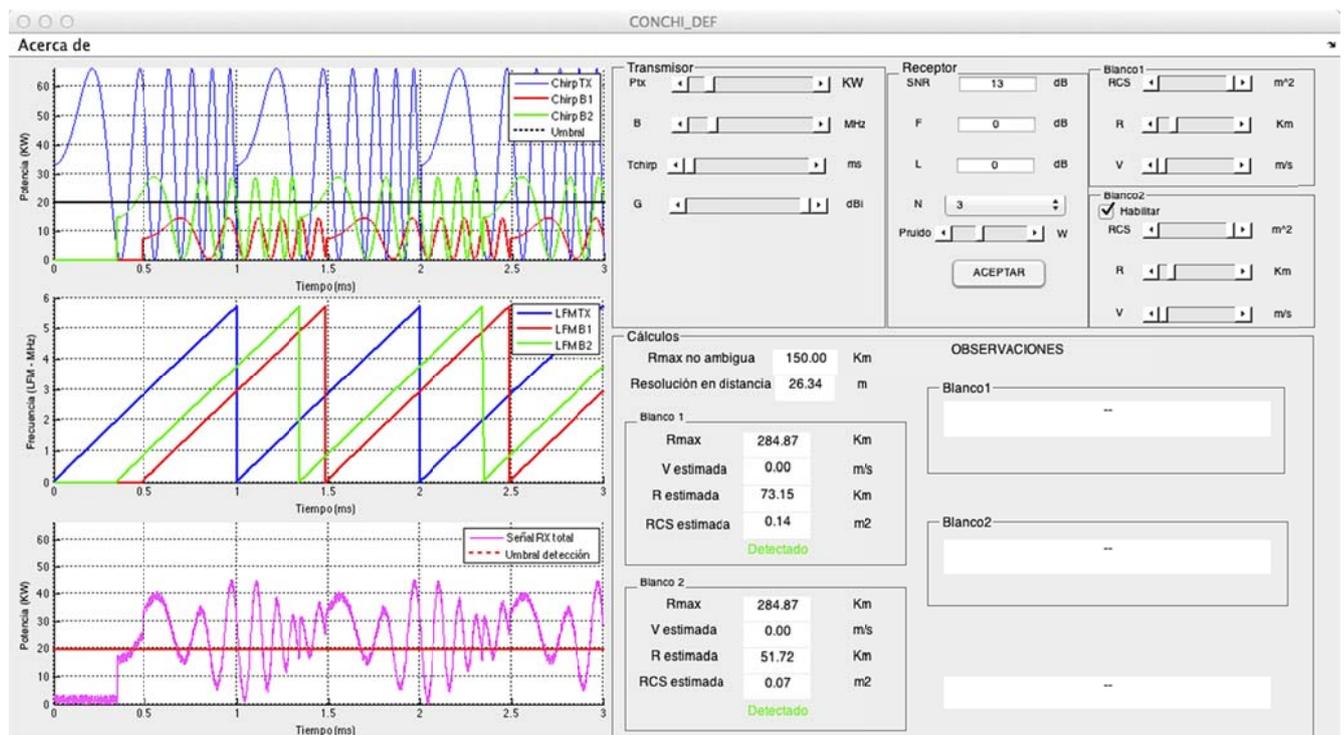
- b) En la segunda figura, se representa la modulación lineal (LFM) de las señales anteriores es decir, los dientes de sierra característicos de la LFM utilizada. Esta señal se representa, por tanto, con respecto a la frecuencia.
- c) Por último, para apreciar cómo el solapamiento de las señales de varios blancos afecta a la señal recibida, en la tercera figura se muestra por pantalla la suma de las señales recibidas de los dos blancos. Con el fin de entender el papel que juega el ruido en la probabilidad de detección (y de falsas alarmas de un radar), se ha añadido la opción de añadir ruido blanco gaussiano a la suma de las señales.

En la parte de cálculos (6), se imprimen por pantalla los cálculos del radar y los correspondientes al primer blanco, así como las observaciones o advertencias de este primer blanco cuando sea necesario (se detallan todos los mensajes en el apartado 3.2.6).

Por defecto, la aplicación arranca con un único blanco habilitado (Blanco 1). Cuando el usuario quiera introducir un segundo blanco en la simulación (5), tendrá que marcar el *checkbox Habilitar*. Introduciendo los datos del blanco y pulsando *Aceptar* obtendrá los resultados para este segundo blanco. Esto significa que, en la primera figura tendremos la representación sinusoidal de la señal transmitida y dos señales recibidas correspondientes a cada uno de los blancos (de forma independiente), al igual que en la segunda figura, donde se muestran los tres dientes de sierra. Se imprimen por pantalla los cálculos del segundo blanco y sus observaciones o advertencias.

Por último para la representación de la tercera figura, al implementar el segundo blanco muestra por pantalla la suma de la dos señales recibidas. Y si éstas han sido recibidas con ruido.

Con el fin de entender de forma intuitiva qué es el umbral de detección, se ha añadido dicho umbral en forma de línea de puntos en la primera y tercera gráfica. De esta forma, con solo ver las gráficas, el usuario puede saber si el radar detectará o no cada uno de los blancos, en función de si su eco radar supera (o no) dicho umbral.



**Figura 3-2 Entorno gráfico principal cuando interactúa el usuario**

### 3.2.2. Introducción de los datos del Transmisor

Para el transmisor hemos colocado un *slider* para cada uno de los datos, en los que el usuario puede elegir los parámetros de cada uno de ellos desplazando la pestaña horizontalmente, como muestra la figura 3-3.

- a) **Potencia Transmitida ( $P_{tx}$ ):** Para esta opción el usuario tiene la opción de introducir valores entre 1-10 KW. Hemos seleccionado estos valores para que sean visibles en nuestra representación gráfica. Si tomáramos valores mayores a éstos, es decir una potencia transmitida mayor, la representación gráfica de las señales recibidas de los blancos sería muy despreciable o casi  $\theta$  con respecto a la transmitida, por lo que no se apreciarían. Como el objetivo de la representación gráfica es que el usuario interprete los resultados, hemos tomado los valores para que la relación entre la señal transmitida y las señales recibidas sea, aproximadamente, del orden de 1/10 en el peor de los casos.
- b) **Ancho de banda ( $B$ ):** Este parámetro determinará la resolución del radar, permitiendo introducir valores entre 1-30 MHz.
- c) **Ancho de pulso ( $T_{chirp}$ ):** Define valores en el rango de 1 a 3 ms. Para el ancho de banda y el ancho de pulso hemos tomado estos valores con el objetivo de representar las señales lo más claras posibles, mostrando las senoides como varían linealmente con la frecuencia. Además para los cálculos obtenidos, estos son valores se ajustan a unos datos coherentes. Nos proporcionan, para nuestro radar, una distancia máxima no ambigua entre 150-450 km y una resolución en distancia entre 5-150 m.
- d) **Ganancia ( $G$ ):** La ganancia en esta aplicación abarca de 10-25 dBi. Se ha tomado estos datos para ajustar los cálculos de los blancos, y obtener resultados gráficos razonados.

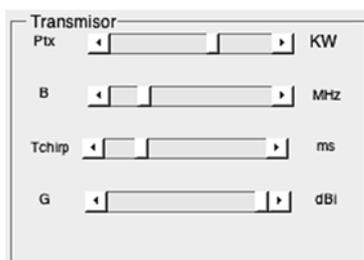


Figura 3-3 Datos transmisor

Para mayor claridad incluimos una tabla 3-1 con los datos resumidos:

Datos Transmisor	Valores máximos/mínimos
Potencia Tx	10-1 KW
Ancho banda (B)	30-1 MHz
Ancho pulso (Tchirp)	3-1ms
Ganancia	25-10 dBi

Tabla 3-1 Datos del transmisor

### 3.2.3. Introducción de los datos del Receptor

Para los datos del receptor se han usado tres campos editables, donde el usuario puede introducir manualmente la relación señal-ruido ( $SNR$ ), la figura de ruido ( $F$ ) y las pérdidas adicionales ( $L$ ) del sistema. Para seleccionar el número de pulsos que se desea visualizar ( $N$ ) se ha utilizado un menú desplegable en el que el usuario elige uno de los parámetros establecidos. Por último se presenta aquí la potencia de ruido con el objetivo de añadir ruido a las señales recibidas, como muestra la figura 3-4.

- a) **Relación señal-ruido (SNR):** El usuario puede elegir el dato que quiera, por defecto se muestra por pantalla y se calcula para un valor de 13dB. Se ha tomado este dato porque es según la figura 3-5 [2] la relación SNR más estándar para una probabilidad de detección de 0,9 y una probabilidad de falsa alarma de  $10^{-6}$ .



The image shows a software interface titled "Receptor". It has several input fields: "SNR" with the value "13" and "dB" next to it; "F" with the value "0" and "dB" next to it; "L" with the value "0" and "dB" next to it; "N" with a dropdown menu showing "3"; and "Ruido" with a slider and "W" next to it. At the bottom, there is a button labeled "ACEPTAR".

Figura 3-4 Datos receptor

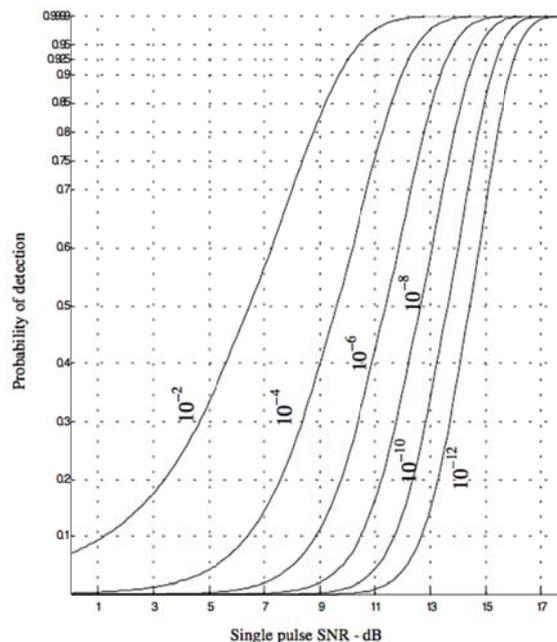


Figura 3-5 Relación SNR en función de la Pd y Pfa [2]

- b) **Figura de ruido (F) y pérdidas (L):** El parámetro establecido inicialmente para ambos es de 0 dB porque suponemos un receptor ideal. Aunque al igual que el anterior el usuario puede modificarlo.
- c) **Numero de Chirps (N):** Al desplegar el menú ofrece valores de 1 a 5 chirps. Por motivos de representación gráfica, se permite representar un máximo de 5 pulsos. Dadas las limitaciones de tamaño de la gráfica, un número mayor de pulsos no habría permitido discernir con claridad todas las señales presentes.
- d) **Potencia de ruido (Pruido):** En este slider el usuario puede observar los cambios que sufren las señales recibidas por motivo del ruido, en este caso ambiente y externo al radar. Se ha configurado el sistema para que muestre el impacto de este elemento, pero tan solo en la señal suma de las señales recibidas (Figura inferior) , pudiendo modificar la potencia de ruido entre 0-10 W.

Recordamos que, como anteriormente, el usuario tiene que pulsar el botón *Aceptar* cada vez que quiera cambiar los parámetros. Resumimos los valores recibidos en la tabla 3-2:

Datos Receptor	Valores máximos-mínimos
SNR	13 dBi
F	0 dB
L	0 dB
N	5-1 Chirp
Pruido	0-10 W

Tabla 3-2 Datos del receptor

#### 3.2.4. Introducción de los datos del blanco

Inicialmente en este apartado de la aplicación, como muestra la Figura 3-3, podemos seleccionar los datos de un blanco al cual nombramos *blanco1*. Tenemos la opción de añadir un segundo blanco, *blanco2*, mediante el *checkbox* (etiquetado como *Habilitar*) como muestra la figura anterior. Ambos blancos incluyen por cada variable un *slider* con el que podemos seleccionar la RCS , la distancia y la velocidad de cada uno de los ellos.

- a) **Habilitar:** Este *checkbox* nos permite, una vez seleccionado, añadir un segundo blanco y modificar sus variables. Como consecuencia, representará las señales del blanco en las figuras e imprimirá los resultados obtenidos en la parte de cálculos y observaciones. En la figura 3-6 podemos apreciar que, una vez seleccionado *Habilitar* somos capaces de variar los parámetros del segundo blanco. Después de pulsar *Habilitar* debemos pulsar el botón *Aceptar*.
- b) **Firma radar (RCS):** Para *blanco1* y *blanco2* hemos tomado los valores del *slider* entre 0-1 m<sup>2</sup>. Estos valores se multiplican por un multiplicador llamado *mRCS*, de valor  $3 \times 10^{19}$ . Estos datos han sido seleccionados con el objeto de poder pintar las señales recibidas por pantalla para que sean visibles y predecibles por el usuario. Este multiplicador se realiza tanto para pintar las señales recibidas como para los cálculos. Debido a que es una simulación, queremos que el usuario comprenda e interprete las gráficas obteniendo resultados coherentes.
- c) **Distancia (R):** Proporciona la distancia de los blancos. Para *blanco1* y *blanco2* los parámetros seleccionados han sido entre 1-0 km. Al igual que en el caso anterior estos valores tanto para representación como para cálculos se han multiplicado por una

constante  $mR$  (Cuyo cálculo se detallará en el manual del programador). Hemos escogido estos valores de acuerdo con los datos tomados del transmisor *Tchirp*. Obtenemos una distancia máxima no ambigua del radar entre 75 -300 km en función de *Tchirp*, por este motivo hemos tomado las distancias de ambos blancos de esta manera, para que experimenten ambos blancos en ocasiones tener una distancia menor a la máxima no ambigua y en otras mayor.

- d) Velocidad ( $v$ ):** La velocidad de los blancos varían para el caso de *blanco1* entre 0-100000 m/s. Se toma este valor con el objeto de cuando calculemos la velocidad estimada mediante frecuencias Doppler, exista un cambio aparente apreciable por el usuario en las señales de la figura 2. Aunque esto tenga como consecuencia unos resultados de velocidad estimada del blanco muy elevados. Para el caso de *blanco2* varía entre 0-100 m/s.

**Figura 3-6 Datos de los blancos**

Datos Blancos	Valores máximos/mínimos
RCS	$(1-0) \times mRCS \text{ m}^2$
Distancia	$(1-0) \times mR \text{ Km}$
Velocidad <i>Blanco1</i>	0-100000 m/s
Velocidad <i>Blanco2</i>	0-100 m/s

**Tabla 3-3 Datos de los blancos**

### 3.2.5. Representaciones gráficas

En el panel se muestran tres figuras. La primera de ellas se representan sinusoidalmente la señal del transmisor y las dos señales del receptor correspondientes a cada uno de los dos blancos. El eje  $y$  representa la Potencia y se mide en kW y el eje  $x$  en función del tiempo y se proporciona en ms. Como vemos en la figura 3-7, la señales están moduladas linealmente en frecuencia (Chirp), y además la

señal transmitida (color azul) emite continuamente empezando en  $t=0$ . Las señales recibidas *blanco1* (color rojo) y *blanco2* (color verde) empiezan en un  $t \neq 0$  y que depende de la distancia de cada uno de los blancos. También se pinta en negro el umbral a partir del cual los blancos son detectados.

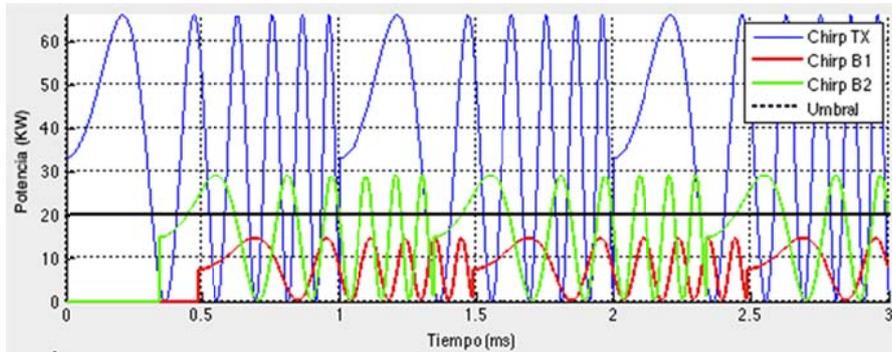


Figura 3-7 Figura 1 representación de las tres señales Chirp

La segunda gráfica muestra también las señales transmitidas y recibidas, pero en este caso, muestra sus modulaciones LFM en forma de diente de sierra. El eje  $x$  se encuentra en función del tiempo, en ms, y el eje  $y$  en función de la frecuencia en MHz. Con esta representación podemos distinguir de forma clara, mediante las diferencias de frecuencias, las señales que corresponden a un blanco u a otro y si los blancos son móviles como varía la  $fd$  (como vimos en el apartado 2.2.4.). Al igual que en la figura anterior a cada señal le corresponde un color y las señales recibidas se inician en función de la distancia del blanco.

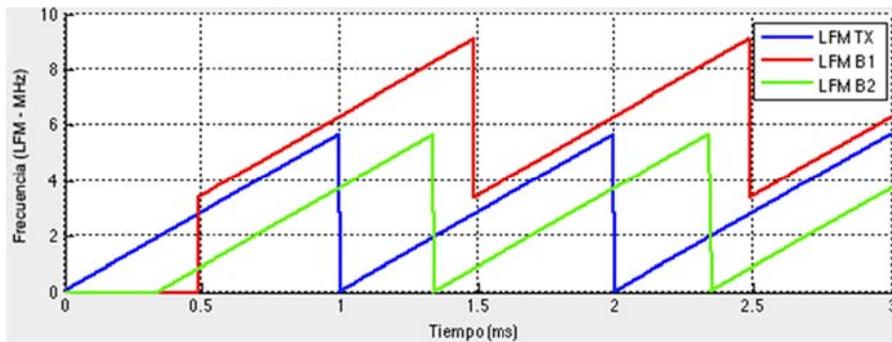
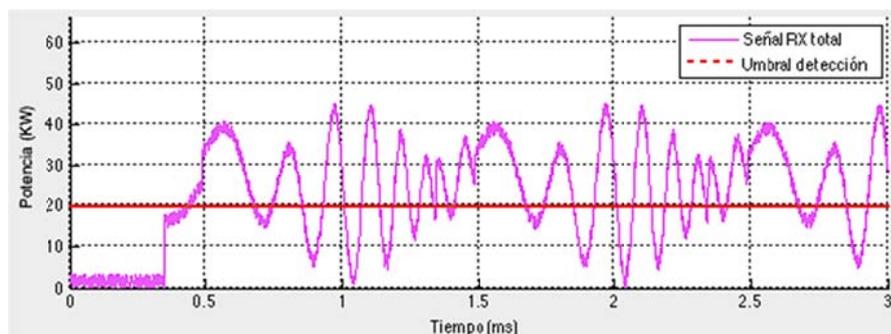


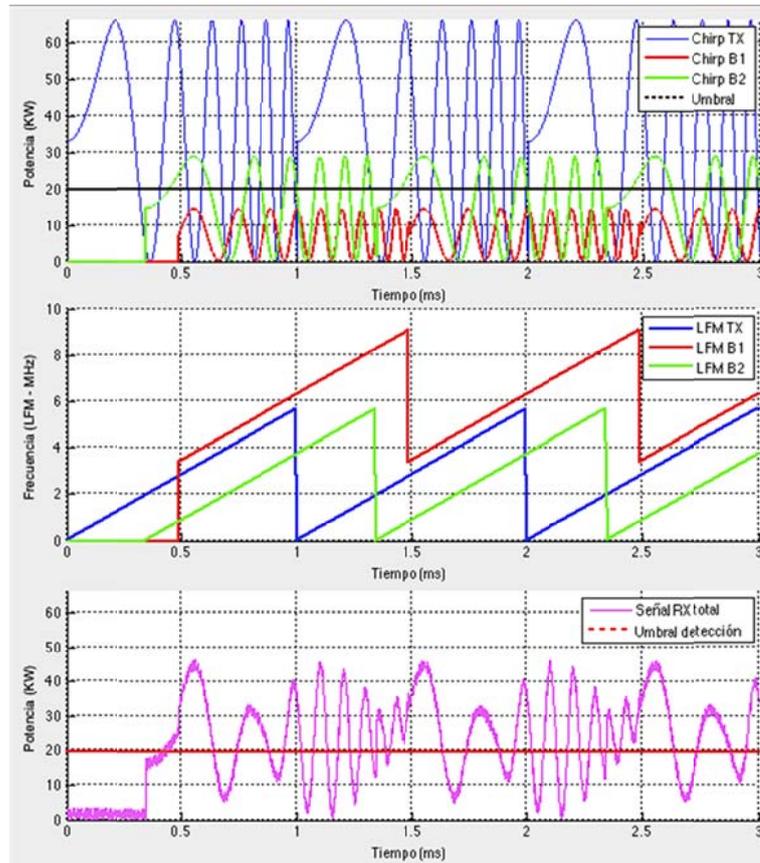
Figura 3-8 Figura 2 señales en forma de dientes de sierra

Por último, la tercera figura representa la suma de las dos señales recibidas, en color magenta, como muestra la figura 3-9. El objetivo de esta representación es mostrar las señales que recibe un radar y que pueden ser recibidas con creado por el ambiente no por el propio radar. Con el *slider* potencia de ruido podemos representar la señal afectada por el ruido.



**Figura 3-9** Figura 3 Suma de las señales recibidas con ruido

La representación gráfica se ha diseñado también con el objetivo de representar las tres figuras en columna con la misma dimensión para poder reconocer cada uno de los chirp en frecuencia , en potencia y la suma de ambos.



**Figura 3-10** Representación de todas las figuras

### 3.2.6. Presentación de cálculos y observaciones

En esta última parte, se muestran los cálculos por pantalla. Los resultados calculados son:

- La distancia máxima no ambigua del radar
- La resolución en distancia
- Para cada uno de los blancos se muestra por pantalla:
  - a) Distancia máxima
  - b) Velocidad estimada
  - c) Distancia estimada
  - d) RCS estimada.
  - e) También advierte si detecta el blanco o no.

Por otro lado, el radar muestra para ambos blancos una serie de advertencias mediante las cuales se transmite si no detecta el blanco (figura 3-11) . Se dan estas advertencias, para cada uno de los blancos, en el caso en el que el blanco se encuentre a mayor distancia de la máxima no ambigua o cuando se solapen en distancia.

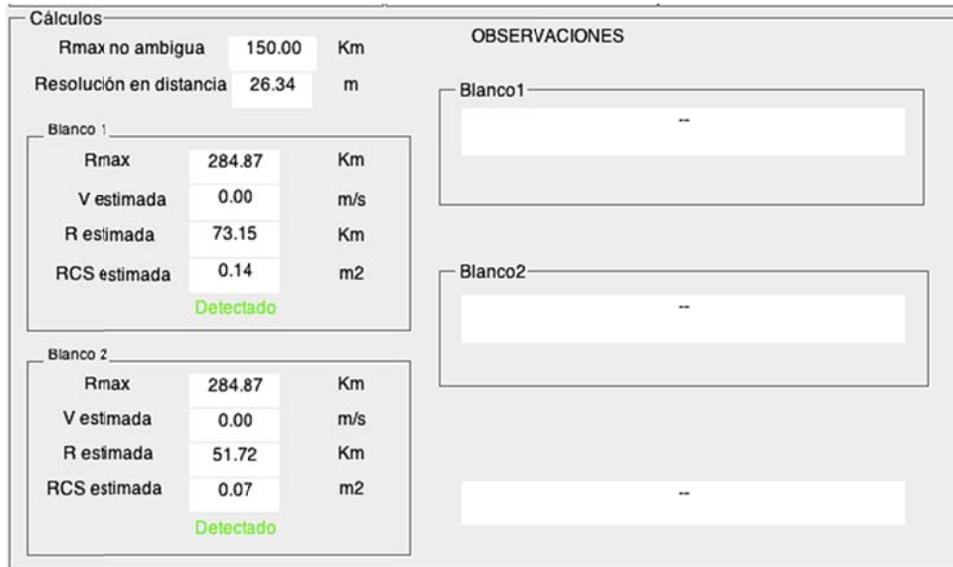


Figura 3-11 Presentación de cálculos y observaciones

A continuación se explicará con detalle como se han realizado los cálculos así como en el que se basa la aplicación para mostrar advertencias.



Figura 3-12 Presentación advertencias

Para este último apartado se explicará como se han desarrollado los cálculos y las observaciones. Como muestra la tabla del *anexo 1* las variables que han estado implicadas en el desarrollo de los cálculos. Para los cálculos todas estas variables están en el sistema internacional de unidades. Se recoge como anteriormente los datos de las funciones según, *recoge\_datos\_tx*, *recoge\_datos\_rx* y *recoge\_datos\_blanco*.

Nuestro primer cálculo es la distancia máxima no ambigua del radar, que se calcula según la siguiente ecuación:

$$R_{max\ no\ ambigua} = c\tau/2 \tag{Ec. 33}$$

Como la distancia depende de  $\tau$ , según los valores máximos y mínimos para nuestro radar obtenemos una distancia máxima no ambigua entre 450 y 150 km.



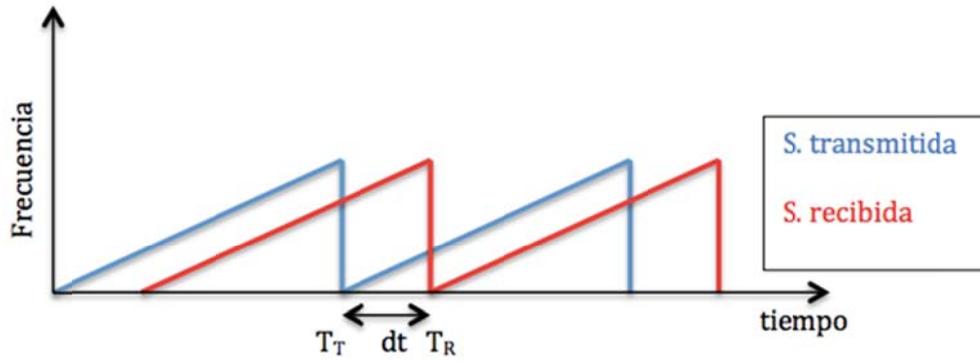


Figura 3-14 Representación de el cálculo de  $dt$  para  $R_{blanco} < R_{max}$  no amigua

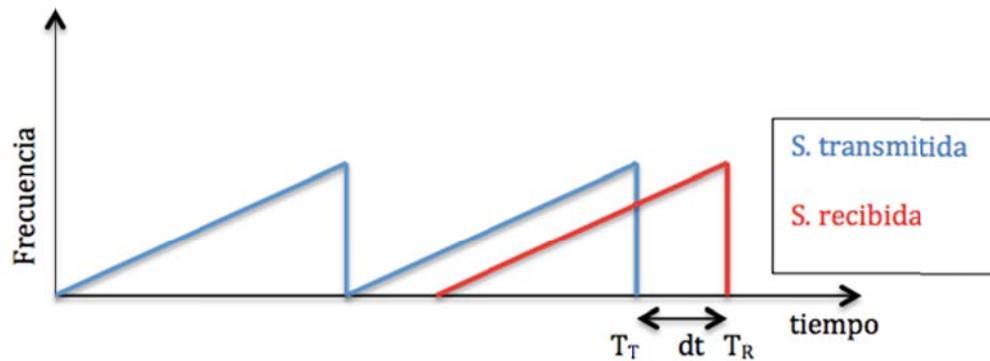


Figura 3-15 Representación de el cálculo de  $dt$  para  $R_{blanco} > R_{max}$  no amigua

Para calcular la  $RCS$  estimada de el blanco, hemos utilizado la ecuación radar, con la particularidad de que, en este caso, la distancia  $R$  es la estimada y la potencia  $Prx$ , es la máxima de la senoide:

$$RCS = \frac{(4\pi)^3 R^4 L}{Pt_x G^2 Prx_{max} \lambda^2} \quad \text{Ec. 38}$$

Después de realizar todos estos cálculos, nuestra aplicación tiene la particularidad de realizar una serie de observaciones:

- Para cada blanco nos transmite si lo detecta o no. Lo detecta en el caso en el que la distancia del blanco (la del *slider*) es menor que la distancia del blanco de la ecuación radar (Ec. 35). Si por el contrario el blanco se encuentra a una distancia mayor de la distancia del blanco de la ecuación radar, no lo detecta.
- También muestra en el panel de observaciones si la distancia a la que se encuentra el blanco (proporcionada por el usuario mediante el *slider*) es mayor que la distancia máxima no ambigua del radar, presenta por pantalla que el blanco está fuera de rango.
- Cuando ambos blancos se encuentran a una distancia menor entre ellas que la resolución en distancia, muestra como observación que ambos blancos se están solapando en distancia.

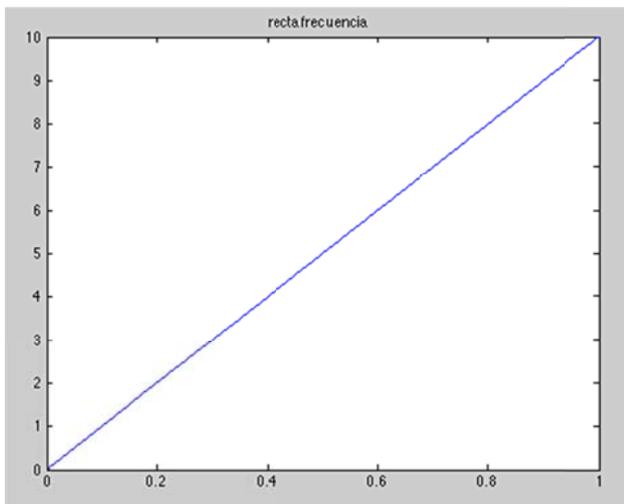
### 3.3. Detalles de implementación

#### 3.3.1. Generación de la señal de Chirp en Matlab

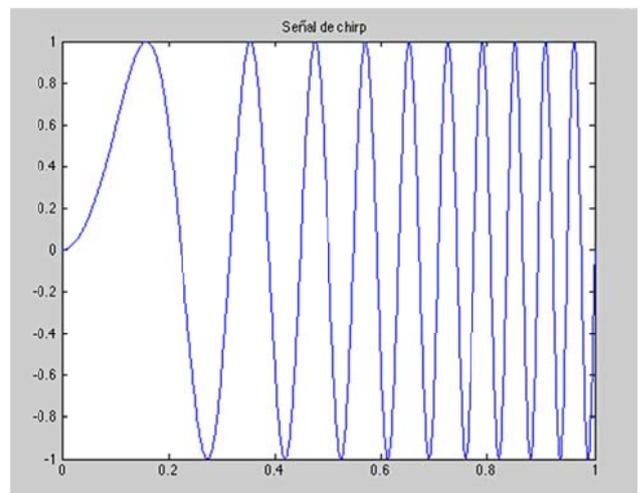
A continuación se detalla la implementación de la modulación lineal en frecuencia. Para la señal de onda continua hemos utilizado la siguiente señal senoidal:

$$y=As \sin(2\pi ft) \tag{Ec. 39}$$

Donde  $A_s$  es la amplitud de la señal y  $f$  es la frecuencia. Como es una senoide modulada en frecuencia,  $f$  varía según la ecuación de una recta,  $y=mx+n$ , como hemos visto anteriormente en este apartado de la señal chirp. Por tanto, creamos la frecuencia como una recta linealmente creciente entre dos puntos  $A=(0,0)$  y  $C=(\tau, B)$ , como muestra la figura 3-16. Una vez que introducimos la frecuencia como el valor de la recta expresada anteriormente, sustituimos su valor en la Ec. 39. Por lo que nuestra señal modulada en frecuencia se representa como muestra la figura 3-16, siendo el eje  $x$  la amplitud y el eje  $y$  el tiempo.



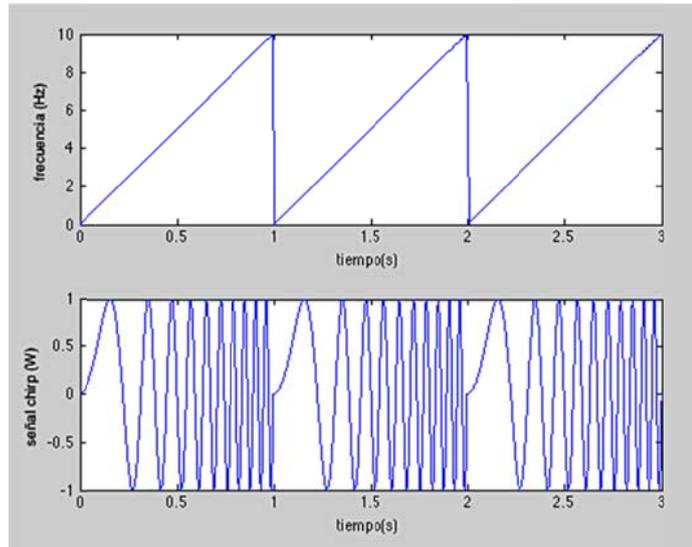
(a) Frecuencia como recta linealmente creciente



(b) Señal Chirp

**Figura 3-16 Modulación lineal en Frecuencia**

A continuación tomamos la senoide anterior y la repetimos en el tiempo un número de veces  $N$ , como muestra la figura 3-17, con el fin de crear el número de tantos Chirp como el usuario quiera. Además, en esta aplicación no solo representamos las señales en forma de senoïdes, sino que también en forma de dientes de sierra, esto es repetir con la misma frecuencia de la figura 3-17, representándola tres veces en el tiempo (LFM):



**Figura 3-17 Señal de tres chirp con respecto a la potencia y la frecuencia**

En el caso de los dientes de sierra se representa las gráfica con respecto a la frecuencia, el objetivo es que el usuario interpretará mejor por la diferencia de frecuencia nuestra señal.

Ahora vamos a explicar como toma la aplicación todos los datos introducidos por el usuario. Para ello se recogen tres funciones, en el *anexo1* se muestra una tabla general con más detalle:

- La primera de ellas toma los datos de el panel del transmisor (*recoge\_datos\_tx*), y transforma estos datos al sistema internacional de unidades.
- La segunda de ellas toma los datos del panel del receptor (*recoge\_datos\_rx*), y transforma estos datos al sistema internacional de unidades.
- La tercera función toma los valores de los blancos (*recoge\_datos\_blanco*), transforma estos datos al sistema internacional de unidades y además utiliza un multiplicador para la RCS y la distancia.

Para la RCS que se introduce en la aplicación se multiplica con un valor  $mRCS = 3 \times 10^{19} \text{ m}^2$ . Y para el multiplicador de distancia lo hemos calculado según la siguiente ecuación, donde  $c$  es la velocidad de la luz,  $\tau$  es el ancho de Chirp y  $N$  el número de Chirp:

$$mR = c\tau N/2 \quad \text{Ec. 40}$$

### 3.3.2. Generación de blancos y cálculo de la señal recibida

Cada blanco está asociado a una señal recibida. En función de la distancia del blanco la señal recibida se presentará antes o después. Para la representación de estas señales se toman los valores como se expresan en el *anexo1*, se toman de las funciones *recoge\_datos\_tx*, *recoge\_datos\_rx* y *recoge\_datos\_blanco*. Y como anteriormente:

- Las unidades de  $TChirp$  que se han tomado en ms, pues el eje x de tiempo se encuentra en esta unidad.
- El ancho de pulso  $B$ , se ha tomado en Mhz.

Debido a que los blancos tienen la opción de ser no estáticos, debemos calcular la frecuencia Doppler, como vimos anteriormente. Despejando de la Ec. 30, obtenemos el valor de  $f_d$ :

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \quad \text{Ec. 41}$$

Esta frecuencia la dejamos expresada en Mhz al igual que el ancho de pulso  $B$ .

Ahora para generar la frecuencia, al igual que la señal transmitida, es una función creciente como la recta,  $y=mx+n$ . En este caso, a diferencia de la señal transmitida, los puntos que definen esta recta son  $A=(0,0+fd)$  y  $C=(\tau, B+fd)$ .

Para la amplitud de la señal recibida la potencia es ahora la potencia recibida, que es mucho menor que la transmitida. Por eso ahora nuestras señales son menores en amplitud, la potencia recibida  $P_{rx}$  se define como:

$$P_{rx} = \frac{P_{tx} G^2 RCS \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L} \quad \text{Ec. 42}$$

Tal y como se expresa para la ecuación equivalente radar, las unidades son todas del sistema internacional de unidades y  $\lambda$  se ha tomado en  $m$  de la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{c \text{ (m/s)}}{f_0 \text{ (Hz)}} \quad \text{Ec. 43}$$

Una vez que tenemos los valores de frecuencia y amplitud, podemos generar las señales recibidas con la Ec. 39 en forma de senoide. Si queremos representar en forma de dientes de sierra, simplemente con la ecuación de la frecuencia (LFM).

Y por último, debemos representar estas señales en el instante de tiempo que sean recibidas por el radar. Para ello nuestra aplicación representa y genera estas gráficas a partir de un  $t_i$ , que corresponde con el tiempo transcurrido entre que se envía la señal transmisora, llega al blanco rebota y la recibe nuestro radar, ese tiempo se define como:

$$t_i = \frac{2R}{c} \quad \text{Ec. 44}$$

Y esto se cumple para la representación de todas las figuras.

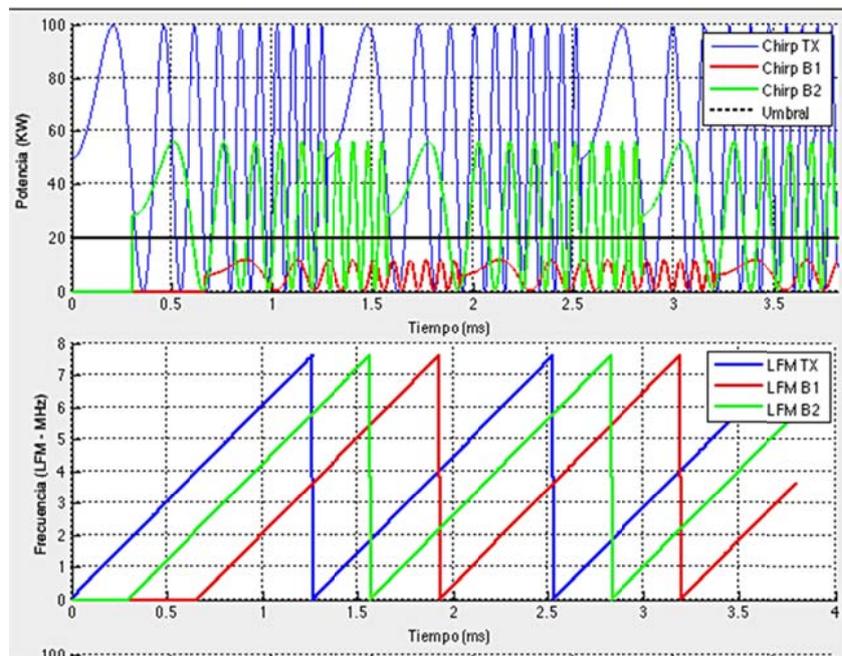


Figura 3-18 Señal transmitida y señales recibida correspondiente a un blanco

Para la figura 3 se representa y se genera una señal que es la suma de ambas señales recibidas. Para ello se toman los datos de las funciones *recoge\_datos\_tx*, *recoge\_datos\_rx* y *recoge\_datos\_blanco*. Para generar el ruido, N:

$$N = kT B + Pruido \quad \text{Ec. 45}$$

Para generarlo Pruido se mide en W, y lo puede elegir el usuario mediante su slider, B se mide en Hz y  $kT = 4 \times 10^{-21}$  en unidades naturales. En cuanto al umbral de detección se representa en función de la SNR introducido por el usuario.

La señal que se muestra en pantalla es la suma de las señales recibidas de los dos blancos y de N definido en la ecuación 31, como muestra la figura 3-19.

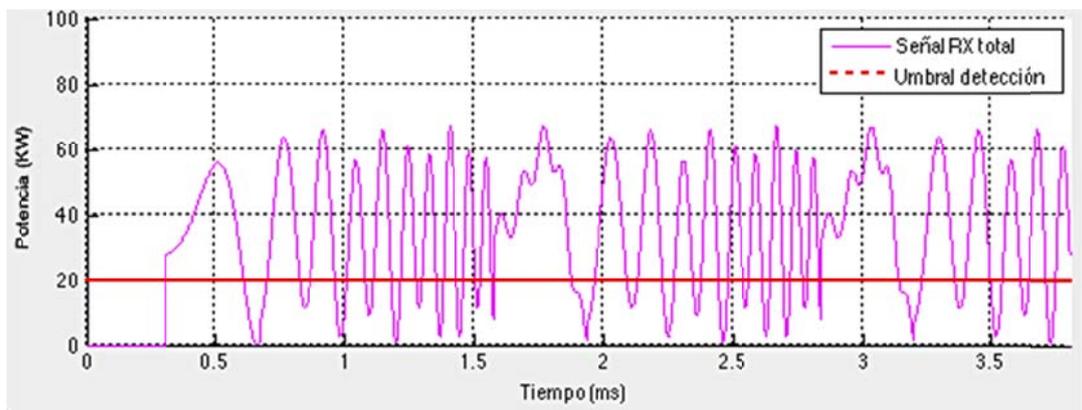


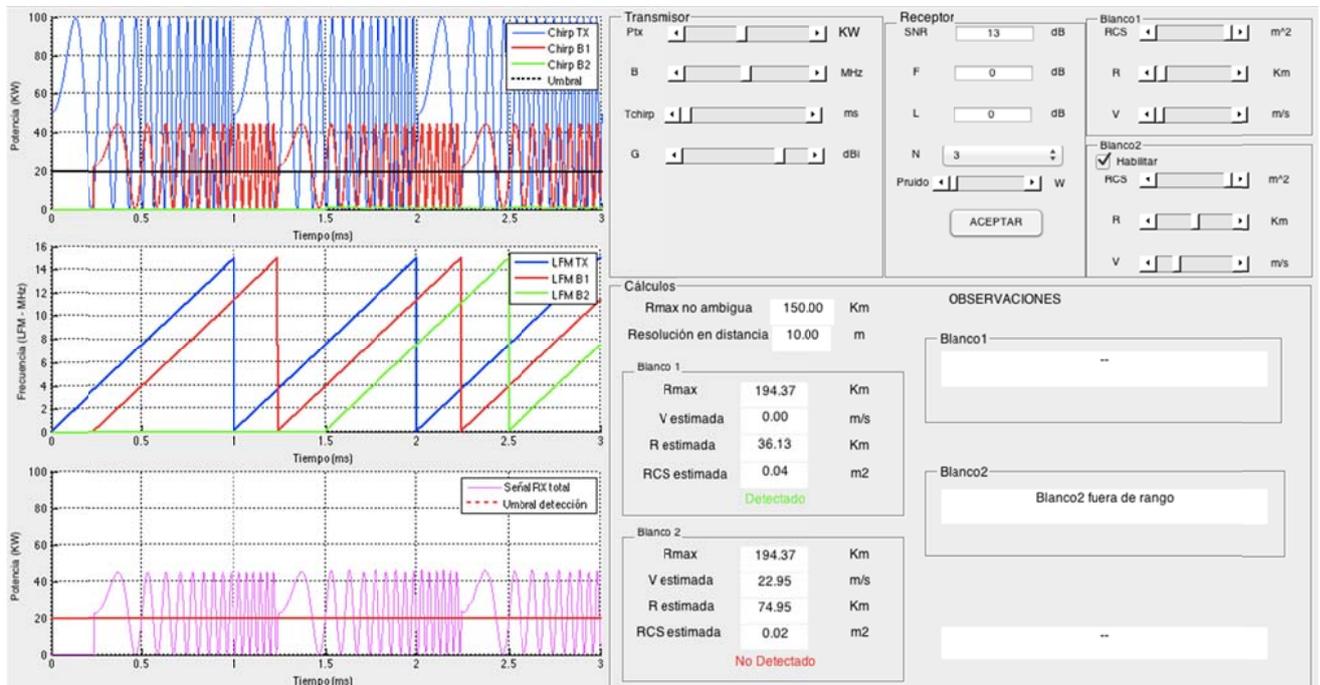
Figura 3-19 Representación de la suma de ambas señales

## 4. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN

A continuación en este apartado se expondrán algunos ejemplos de la aplicación y sus resultados gráficos.

### 4.1. Detección simple de blancos

A través de este ejemplo realizaremos la detección simple de un blanco interpretando sus resultados. Seleccionamos los datos del transmisor, los del receptor y los del *Blanco1*. Luego pulsamos *Habilitar* para seleccionar los datos de *Blanco2*. Pulsamos *Aceptar* y se muestra por pantalla la figura 4-1:



**Figura 4-1 Ejemplo detección simple blancos**

Fijándonos en la figura 1, podemos apreciar que se han pintado las señales para tres pulsos (o Chirps). Efectivamente, si nos fijamos en el panel del receptor, se ha seleccionado ese número. De la figura 1 también podemos intuir que se ha representado de forma clara el *blanco1*, que el primer Chirp se ha recibido mientras aún continuaba el primer Chirp de la señal transmitida, y que ha quedado por

encima del umbral de detección. Mientras que, de acuerdo al segundo blanco, no lo apreciamos bien, no sabemos en que momento se ha recibido su primer chirp y observamos de forma clara que no ha llegado al umbral de detección. Por lo que, únicamente fijándonos en la figura 1 podemos deducir que se ha detectado el *blanco1*, pero no el *blanco2*.

Si nos fijamos en la figura 2, apreciamos que el blanco1 está estático, no hay diferencias de picos en frecuencia entre la señal recibida y la transmitida y nos aseguramos entonces que, el primer chirp del primer blanco corresponde con el primer chirp de la señal transmitida. Con respecto al segundo blanco, podemos intuir que es móvil, pues se aprecia una pequeña de diferencias de máximos en frecuencia con respecto a la transmitida. Y finalmente sabemos que el segundo blanco se encuentra a una distancia mayor que la máxima no ambigua del radar, pues su primer Chirp se recibe cuando se está transmitiendo el segundo Chirp de la transmitida.

Fijándonos en la figura 3, se presenta la suma de ambas señales recibidas, sin ruido y por encima del umbral de detección, y prácticamente la suma se debe principalmente al *blanco1*.

Vamos a interpretar los resultados en el panel de cálculos y observaciones, para contrastar lo que muestra el resultado gráfico, con el resultado matemático. Se muestra en la figura 4-2 estos resultados:



Figura 4-2 Ejemplo detección simple de blancos

Como vemos en la figura 4-2, la distancia máxima no ambigua de el radar es de 150km. El *blanco1* se encontraba a una distancia menor y por ello en la representación gráfica su primer chirp correspondía con el primer chirp de la transmitida. Como no fue así en el *blanco2*, se encontraba a una distancia mayor de 150 km, por ello se muestra en observaciones, “ Blanco2 fuera de rango”.

También comprobamos que el primer blanco se encuentra a una distancia menor de su distancia máxima (Rmax) , estaba por encima del umbral y por ello se muestra en su panel en letras verdes “ Detectado”. Todo lo contrario le ocurría al *blanco2*, por ello muestra por pantalla “No detectado” en letras rojas.

Por último vemos que el primer blanco era estático, *Vestimada* es cero, mientras que el segundo era móvil. Y a pesar de que ambos en su *slider* tenían la misma RCS, la estimada del *blanco1* es mayor pues estaba más cerca que el *blanco2*.

Esto es un ejemplo de una detección simple de blancos, donde el usuario puede interpretar y comparar según los datos introducidos, los resultados gráficos y matemáticos de nuestra aplicación.

## 4.2. Estimación de la velocidad del blanco

A continuación mostraremos otro ejemplo relacionado con las velocidades de los blancos. Comenzamos abriendo nuestra aplicación, elegimos unos parámetros para el transmisor, receptor, ambos blancos y pulsamos *Aceptar*. El resultado que aparece en pantalla es el que muestra la figura 4-3. Como en el ejemplo anterior, nos fijamos en todas las figuras, para la interpretación gráfica.

En la figura 1, podemos visualizar que esta vez se representan cuatro pulsos (o Chirps). El segundo blanco se detecta en distancia (el primer chirp corresponde con el primero de la transmitida) y está por encima del umbral de la relación señal ruido. Del primer blanco en la primera figura no somos capaces de distinguirlo.

Fijándonos en la figura 2 se corresponden nuestros argumentos del *blanco2*, y en cuanto al *blanco1* observamos que su primer Chirp empieza cuando en tiempo se transmite el segundo chirp de la transmitida (es decir el blanco está a una distancia mayor de la máxima no ambigua). Pero lo que nos llama más la atención es la diferencia de máximos en frecuencia (picos de las señales) entre el primer blanco y la señal transmitida. Luego, sabemos que por esa diferencia en la frecuencia Doppler, *fd*, el *blanco1* está móvil.

En la figura 3 la suma de las señales recibidas se ha recibido con ruido y está por encima del umbral de detección.

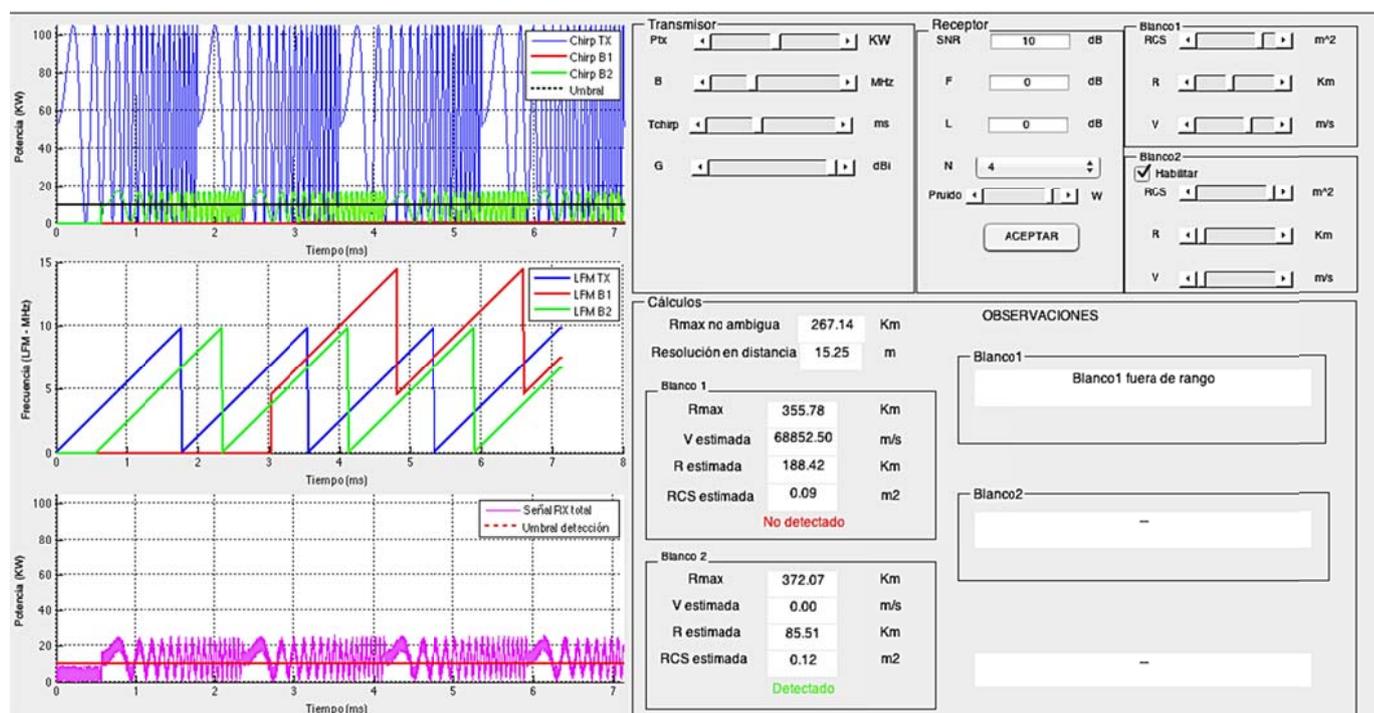


Figura 4-3 Ejemplo Cálculo de velocidades de blanco

Observando de nuevo con detalle nuestro panel de cálculos y observaciones:



Figura 4-4 Ejemplo Cálculo de velocidades de blanco

Como vemos en la figura, el *blanco1* no solo efectivamente estaba fuera del alcance del radar, sino que también, es un blanco móvil pues su velocidad estimada es de 68852,5 m/s. A este blanco le hemos seleccionado unos parámetros de velocidad tan elevada en su *slider*, como expresamos anteriormente, porque queremos que para el usuario la parte gráfica sea lo más visual posible y pueda reconocer esa diferencia de picos en frecuencia, pueda interpretar la frecuencia Doppler.

### 4.3. Discriminación entre blancos contiguos

Por último mostraremos lo que presenta nuestra aplicación cuando tenemos blancos muy próximos entre ellos y nos somos capaces de distinguirlos. Por ello en la parte de cálculos, al igual que con la distancia máxima, se calcula la resolución en distancia del radar en todo momento. Una vez que elegimos nuestros parámetros, en cuanto a transmisor, receptor y blancos se representa por pantalla la figura 4-5.

En la cual observamos que en la figura 1 hemos seleccionado dos Chirp. La señal transmitida se diferencia con bastantes claridad, y esta vez las dos señales recibidas de los blancos son muy parecidas. En el mismo instante se han representado ambas, por lo que podemos sospechar que estos blancos están muy próximos en distancia.

Si nos fijamos en la figura 2, comprobamos que ambos blanco se encuentran a la misma distancia con respecto al radar, pues la señal del *blanco1* ha quedado oculta por la del *blanco2*. Pero ambos blancos en distancia no están fuera del rango (el primer chirp de cada blanco se corresponde con el primero de la señal transmitida), por lo que sabemos que sus distancias son menores a la máxima no ambigua del radar.

Por último, en la figura 3 se muestra la suma de ambas señales muy por encima del umbral de detección.

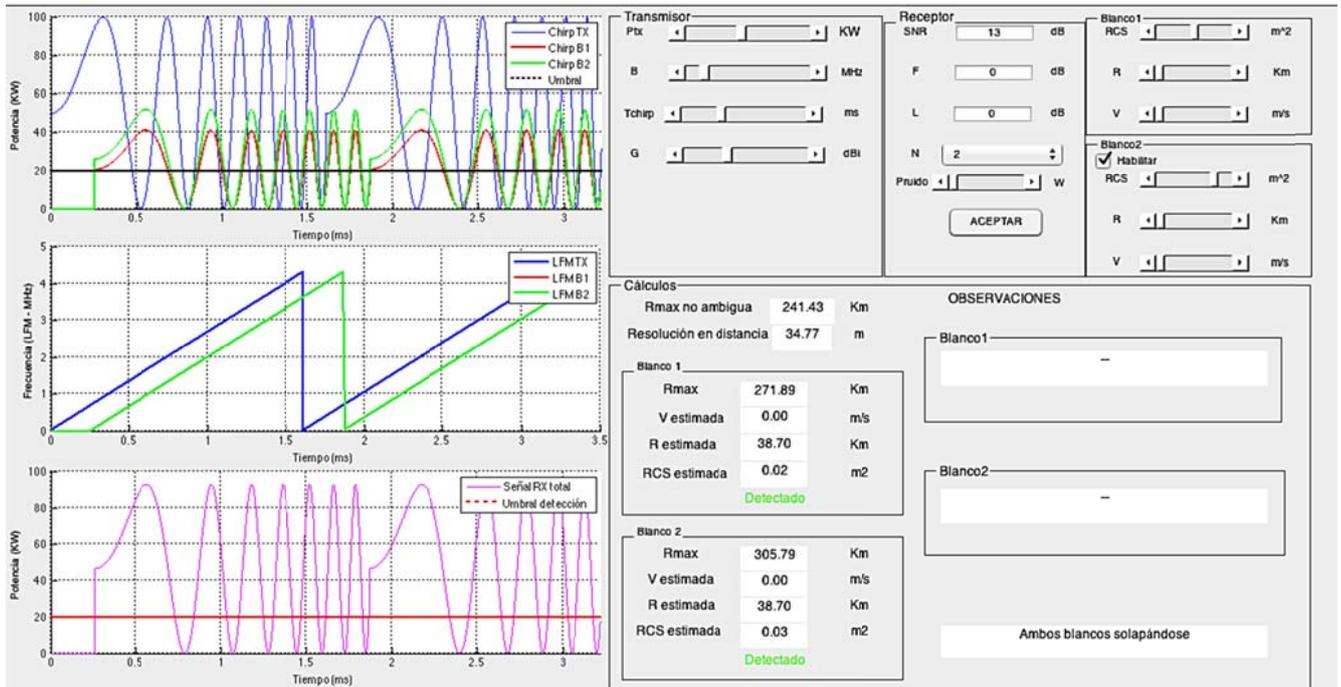


Figura 4-5 Ejemplo diferenciación entre blancos contiguos

Fijándonos entonces con más detalles en los cálculos y observaciones, como muestra la figura 4-6:

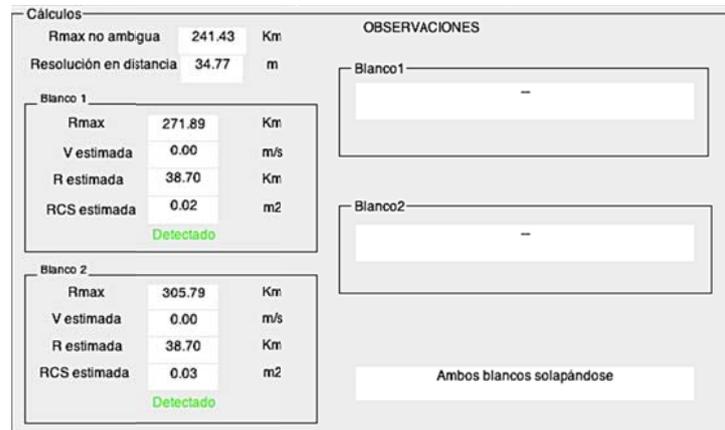


Figura 4-6 Ejemplo diferenciación entre blancos contiguos

Como observamos en esta última figura, con respecto a los cálculos, es que la resolución en distancia es de 34,77 m, y ambos blancos se encontraban a una distancia entre ellos menor a esta. Como resultado de esto, se muestra por pantalla como observación “ Ambos blancos solapándose”. Por otro lado ambos blancos se detectan en distancia como interpretamos en las figuras, por lo tanto no tenemos ninguna observación con respecto a eso.



## 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1. Conclusiones

Se ha desarrollado una aplicación versátil e intuitiva, que agiliza el aprendizaje de los conceptos básicos y funcionamiento de un radar de onda continua. El programa implementado permite al usuario interactuar con la plataforma, permitiéndole contrastar los resultados obtenidos mediante las gráficas u observaciones, y aprendiendo, de una manera entretenida, cómo funciona un radar onda continua modulado en frecuencia.

Se han cumplido, por tanto, los objetivos iniciales fijados para este trabajo.

### 5.2. Líneas futuras

Al haberse desarrollado una aplicación modular, las posibles líneas futuras pasan por implementar módulos adicionales, como pueden ser:

- Se podría adaptar un banco de filtros Doppler, detector de blancos móviles (MTI) o detector de blancos Doppler (MTD) para las señales recibidas.
- Generar una señal cuya periodicidad en la modulación de la frecuencia pueda ser triangular en vez de ser en diente de sierra.
- La aplicación podría implementar los blancos aleatorios, sin la necesidad de que el usuario configure los parámetros del blanco, es decir su RCS, distancia y velocidad.
- Desarrollar una cuarta figura que nos represente la imagen que representa la pantalla de un radar, esto es su PPI (*Plan Position Indicator*).
- Incrementar las posibilidades de procesamiento de señal para incluir distintas técnicas, como el enventanado,.
- Posibilidad de añadir modulaciones en fase, etc.



## 6. BIBLIOGRAFÍA

A continuación se detallan todas las referencias bibliográficas utilizadas en la realización de este trabajo, que comprenden diversos libros.

- [1] Instituto Hidrográfico de la marina. *Reglamento internacional para prevenir los abordajes 1972*. Novena edición, 2009.
- [2] Curry G. R., *Radar Essentials*. Scitech Publishing, 2012.
- [3] Skolnik, M. I. *Radar Handbook*. McGRAW-Hill International Ed., 1990.
- [4] Skolnik, M. I. *Introduction to Radar System*. McGRAW-Hill International editions, 2001.
- [5] Bassem, M. *Radar System Analysis and Design Using Matlab*. Chapman and Hall/CRC, 2000.
- [6] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analipsis and Design Using MATLAB*, Chapman & Hall/CRC, 2013.
- [7] Fred E. Nathanson, *Radar Design Principles*. Scitech Publishing, Inc., 1991.
- [8] Gregory L. Charvat. *Small and short range radar systems*. Taylor and Francis Group, LLC, 2014.



## ANEXO I: VARIABLES UTILIZADAS Y RANGO DE CADA UNA DE ELLAS

Se presentan los datos al usuario	Recoge los datos la aplicación y los guarda	Generación y representación gráfica de las señales	Cálculo de los resultados
Ptx = (10-1) kW	DatosTx.Ptx = (Ptx)x10 <sup>3</sup> W	DatosTx.Ptx = (Ptx)x10 <sup>3</sup> W	DatosTx.Ptx = (Ptx)x10 <sup>3</sup> W
B = (30-1)MHz	DatosTx.B = Bx10 <sup>6</sup> Hz	DatosTx.B = Bx10 <sup>-6</sup> MHz	DatosTx.B = Bx10 <sup>6</sup> Hz
TChirp = (3-1)ms	DatosTx.Pw = TChirpx10 <sup>-3</sup> s	DatosTx.Pw = TChirpx10 <sup>3</sup> ms	DatosTx.Pw = TChirpx10 <sup>-3</sup> s
G = (25-10)dbi	DatosTx.G = G (UN)	DatosTx.G = G (UN)	DatosTx.G = G (UN)
N = (5-1) Chirp	DatosTx.N = N	DatosTx.N = N	DatosTx.N = N
-----			
SNR = 13dB	DatosTx.Fo = 10*10 <sup>9</sup> Hz	DatosTx.Fo = 10 GHz	DatosTx.Fo = 10*10 <sup>9</sup> Hz
L = 0dB	DatosRx.SNR = SNR (UN)	DatosRx.SNR = SNR (UN)	DatosRx.SNR = SNR (UN)
F = 0dB	DatosRx.L = L (UN)	DatosRx.L = L (UN)	DatosRx.L = L (UN)
Pruido = (10-0) W	DatosRx.F = F (UN)	DatosRx.F = F (UN)	DatosRx.F = F (UN)
RCS1 = (1-0) m <sup>2</sup>	DatosRx.No = No W	DatosRx.No = No W	-----
	DatosBlanco(1).RCS = RCS*mRCS m <sup>2</sup>	DatosBlanco(1).RCS = RCS*mRCS m <sup>2</sup>	DatosBlanco(1).RCS = RCS*mRCS m <sup>2</sup>
Distancia1 = (1-0) km	DatosBlanco(1).R = distancia * mR m	DatosBlanco(1).R = distancia * mR m	DatosBlanco(1).R = distancia * mR m
Velocidad1 = (10 <sup>5</sup> -0) m/s	DatosBlanco(1).V = velocidad m/s	DatosBlanco(1).V = velocidad m/s	DatosBlanco(1).V = velocidad m/s
RCS2 = (1-0) m <sup>2</sup>	DatosBlanco(2).RCS = RCS*mRCS m <sup>2</sup>	DatosBlanco(2).RCS = RCS*mRCS m <sup>2</sup>	DatosBlanco(2).RCS = RCS*mRCS m <sup>2</sup>
Distancia2 = (1-0) km	DatosBlanco(2).R = distancia * mR m	DatosBlanco(2).R = distancia * mR m	DatosBlanco(2).R = distancia * mR m
Velocidad2 = (10 <sup>5</sup> -0) m/s	DatosBlanco(2).RCS = RCS*mRCS m/s	DatosBlanco(2).RCS = RCS*mRCS m/s	DatosBlanco(2).RCS = RCS*mRCS m/s
-----	t = DatosTx.EjeX ms	t = DatosTx.EjeX ms	-----
-----	kT = 4x10 <sup>-21</sup> (UN)	kT = 4x10 <sup>-21</sup> (UN)	kT = 4x10 <sup>-21</sup> (UN)

