



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*SimRAD: Implantación de un módulo de procesado  
de señal RADAR*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**ALUMNO:** Pablo Sánchez Vázquez

**DIRECTORA:** Paula Gómez Pérez

**CURSO ACADÉMICO:** 2020-2021

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*SimRAD: Implantación de un módulo de procesado  
de señal RADAR*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

Universida<sub>de</sub>Vigo



# RESUMEN

El presente trabajo mejora el simulador de radares pulsados (SimRAD) a través de una serie de funcionalidades que aumentan las capacidades actuales. Este simulador se desarrolla bajo el entorno de programación MATLAB que permite gran variedad de posibilidades, y su reciente aplicación para crear interfaces gráficas, *App Designer*.

Entre las principales mejoras destacan una interfaz gráfica rediseñada que facilita el entendimiento y el manejo del usuario en este tipo de sistemas radar, así como la implementación de un módulo de procesado de señal.

Con él se pretende que sirva de herramienta para que el usuario/alumno interiorice los conceptos básicos de un radar pulsado y su funcionamiento interno, gracias a la implementación de los módulos principales que los componen, como son: el módulo de integración de pulsos coherente e incoherente, módulo de compresión de pulsos en fase y en frecuencia, módulo de filtro adaptado, y módulo de enventanado de tiempo cuando sea necesario.

Este simulador permite entrenar al alumno que, a partir de los conceptos adquiridos de la teoría radar y antes de enfrentarse al sistema radar pulsado a bordo de los barcos, desea tener la práctica suficiente y haber adquirido los conceptos necesarios para su futuro desempeño.

## PALABRAS CLAVE

Radar, simulador, procesado de señal, filtro adaptado, compresión de pulsos, enventanado.



# AGRADECIMIENTOS

Dado a que este trabajo culmina con la finalización de mis estudios en la Escuela Naval Militar quería agradecer a todas aquellos profesores (civiles y militares) que con su esfuerzo y dedicación han sido todo un ejemplo para mí. Entre ellos, destaco en especial a mi tutora, Doña Paula Gómez Pérez, cuya inmensa ayuda ha sido vital para la elaboración y el desarrollo del presente trabajo.

Además, me gustaría agradecer a todas aquellas personas que han estado a mi lado apoyándome, tanto en mis días buenos como en los malos, a mis padres y hermanos, a mi novia Paz, y a mis compañeros, Miguel Ángel, Carlos, Jorge, Luis y Natt, que han seguido el trabajo desde su origen hasta su finalización mostrando gran interés, y dándome ánimos para continuar.



# CONTENIDO

Contenido .....	1
Índice de Figuras .....	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos .....	7
1.1 Introducción .....	7
1.2 Objetivos .....	7
2 Estado del arte de los simuladores RADAR .....	9
2.1 Simuladores radar comerciales .....	9
2.2 Simuladores docentes actuales .....	11
2.3 Necesidad TFG .....	12
3 Introducción a los sistemas RADAR.....	15
3.1 Introducción .....	15
3.2 Parámetros fundamentales Sistemas Radar Pulsado .....	16
3.2.1 Distancia al blanco .....	16
3.2.2 PRI, PRF y ciclo de trabajo .....	16
3.2.3 Alcance máximo del sistema .....	17
3.2.4 Alcance mínimo del sistema .....	18
3.2.5 Resolución Radar .....	19
3.2.6 Velocidad de rotación y tiempo de observación .....	19
3.2.7 Potencia y energía .....	20
3.3 Ecuación de alcance radar .....	20
3.3.1 Sensibilidad y Relación Señal a Ruido .....	22
3.3.2 Sección Radar (RCS, Radar Cross Section) .....	23
3.3.3 Pérdidas del sistema.....	24
3.4 Procesado de señal en sistemas radar pulsados .....	26
3.4.1 Integración de pulsos .....	27
3.4.2 Compresión de pulsos .....	28
4 Desarrollo del TFG.....	31
4.1 Introducción .....	31
4.2 Generación de la señal Transmitida .....	31
4.2.1 Generación de la señal patrón básica .....	31
4.2.2 Señal modulada en frecuencia o chirp .....	32
4.2.3 Señal modulada en fase .....	32

4.3	Generación señal Recibida .....	34
4.3.1	Estimación potencia recibida y posición del blanco .....	34
4.3.2	Generar señal recibida .....	34
4.4	Módulo de integración de pulsos .....	35
4.4.1	Integración coherente.....	35
4.4.2	Integración incoherente.....	36
4.4.3	Comparación entre la integración coherente e incoherente .....	36
4.5	Compresión de pulsos y filtro adaptado.....	38
4.5.1	Correlación señal senoidal .....	38
4.5.2	Correlación señal modulada en frecuencia y en fase .....	39
4.5.3	Enventanado señal modulada en fase .....	42
4.6	Recepción y detección de blancos.....	44
5	Manual de Usuario .....	45
5.1	Introducción .....	45
5.2	Menú principal .....	45
5.3	Radar con integración coherente .....	46
5.3.1	Transmisor .....	47
5.3.2	Forma de onda .....	48
5.3.3	Antena.....	52
5.3.4	Configuración Blancos .....	53
5.3.5	Integración de pulsos .....	54
5.3.6	Enventanado .....	55
5.3.7	Representar Señal Transmitida .....	57
5.3.8	Representar Blancos .....	57
5.3.9	Representar integración de pulsos .....	58
5.3.10	Representar filtro adaptado .....	59
5.3.11	Detector.....	60
5.4	Radar con integración incoherente.....	61
5.4.1	Configuración integración incoherente.....	62
5.4.2	Representar integración no coherente.....	62
6	Conclusiones y líneas futuras .....	65
6.1	Conclusiones .....	65
6.2	Líneas futuras .....	65
7	Bibliografía.....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 SPx Radar Simulator .....	10
Figura 2-2 PCRadar ARPA Radar Display .....	10
Figura 2-3 SimRAD TFG .....	11
Figura 2-4 Simulador radar docente actual .....	12
Figura 3-1 Horizonte geométrico y horizonte radar .....	18
Figura 3-2 Escala Radar .....	18
Figura 3-3: Dependencia de la RCS con la frecuencia [7] .....	24
Figura 3-4 Ejemplo Pérdidas SWERLING .....	25
Figura 3-5: Diagrama de bloques sistema radar pulsado.....	26
Figura 3-6 Señal <i>Chirp</i> .....	29
Figura 3-7 Señal modulada en fase .....	30
Figura 4-1 Señal patrón senoide constante .....	32
Figura 4-2 Señal Patrón modulada en frecuencia.....	32
Figura 4-3 Señal Patrón modulada en fase .....	33
Figura 4-4 Señal Patrón en PRI.....	33
Figura 4-5 Señal recibida de cada blanco .....	34
Figura 4-6 Señal recibida total .....	35
Figura 4-7 Integración coherente.....	35
Figura 4-8 Integración no coherente o incoherente .....	36
Figura 4-9 Comparación Integración.....	37
Figura 4-10 Comparación de los dos tipos de integración en dos gráficas .....	37
Figura 4-11 Correlación señal senoidal.....	38
Figura 4-12 Señal <i>chirp</i> generada.....	39
Figura 4-13 Correlación cruzada entre la señal modulada en frecuencia y la señal recibida.....	39
Figura 4-14 Señal modulada con código pseudoaleatorio.....	40
Figura 4-15 Señal modulada con código Barker .....	40
Figura 4-16 Autocorrelación señal modulada en fase y señal recibida .....	41
Figura 4-17 Comparación compresión de pulsos .....	42
Figura 4-18 Señal modulada en fase enventanada .....	43
Figura 4-19 Comparación ventanas temporales .....	43
Figura 4-20 Diagrama de bloques .....	44
Figura 5-1 Menú Principal .....	46
Figura 5-2 Radar con integración coherente .....	47
Figura 5-3 Transmisor .....	48

Figura 5-4 Forma de onda .....	49
Figura 5-5 Configuración de la señal senoidal básica .....	49
Figura 5-6 Configuración de la señal con compresión en fase.....	50
Figura 5-7 Código pseudoaleatorio de 128 chips .....	51
Figura 5-8 Configuración de la señal con compresión de pulsos en frecuencia .....	52
Figura 5-9 Antena.....	53
Figura 5-10 Configuración blancos .....	54
Figura 5-11 Configuración Integrador de pulsos.....	55
Figura 5-12 Enventanado .....	56
Figura 5-13 Comparación ventanas temporales .....	56
Figura 5-14 Señal Transmitida .....	57
Figura 5-15 Representar Blancos .....	58
Figura 5-16 Integración de pulsos .....	59
Figura 5-17 Filtro adaptado .....	59
Figura 5-18 Detector .....	60
Figura 5-19 Radar con integración incoherente .....	61
Figura 5-20 Configuración integración de pulsos incoherente.....	62
Figura 5-21 Integración de pulsos incoherente .....	63

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Modelos de RCS de blancos fluctuantes .....	26
---	----



# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Introducción

El Radar es un sistema electromagnético para la detección y localización de objetos reflectantes tales como aeronaves, barcos, vehículos, personas y el entorno natural. Su término deriva del acrónimo anglosajón “*Radio Detection And Ranging*”. Este sistema se utiliza 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 se reflejan en algún objeto y se reciben en la misma posición del emisor.

Se ha extendido tanto el uso del radar, que es necesario su estudio y aprendizaje. En muchas ocasiones, no se puede hacer uso de éste ya que, en el caso de los barcos, hace falta salir a la mar y encontrarse con diferentes situaciones de las habría que solventar. Por lo tanto, se le da a su estudio un enfoque más teórico que práctico. Es por ello que existe la necesidad de crear un simulador que se asemeje lo máximo posible a una consola radar, que permita la introducción de una serie de parámetros por el operario y que en él se refleje los cambios en la detección que ellos suponen.

Para desarrollar este TFG, el software que se utilizará será MATLAB, “*Matrix Laboratory*” o “Laboratorio de matrices”. Es un software matemático con un lenguaje de programación propio, de alto nivel, llamado Lenguaje M. Este lenguaje se creó en 1970 proporcionando un lenguaje sencillo al software de matrices sin tener que hacer uso del lenguaje Fortran. Pero, no fue hasta 1984, cuando Cleve Moler creó la primera versión, con la idea de usar paquetes de subrutinas escritas en Fortran sin necesidad de programas que usaran este lenguaje. Dentro de sus principales funciones se encuentran, uso y cálculo de matrices, representación de funciones, creación de interfaces gráficas para el usuario, implementación de algoritmos y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

## 1.2 Objetivos

El presente TFG pretende mejorar el simulador de radares pulsados (SimRAD) a través de una serie de funcionalidades que aumenten las capacidades actuales del mismo. Este trabajo consistirá en la generación de una interfaz gráfica de un radar de onda pulsado, una consola radar, donde el alumno sea capaz de modificar diferentes parámetros y ver así el impacto que dicho cambio produce en la detección y el seguimiento de blancos. Para implementar esta interfaz gráfica y para generar el código y las funciones necesarias de este trabajo, se hará uso del software matemático Matlab.

Con este trabajo se persigue que el alumno adquiera los conocimientos básicos de un radar pulsado, que sea capaz de comprender e interiorizar la teoría que se estudia y pueda ponerlos en práctica. Matlab, como se ha dicho anteriormente, permite la creación de interfaces gráficas, y gracias a este simulador, el alumno podrá aprender de una forma más visual y creativa.

Además, este trabajo trae consigo una serie de mejoras a través de la implementación de diferentes funcionalidades, lo que lo hace aún más atractivo para el alumnado. Se adaptará una nueva interfaz gráfica para facilitar la comprensión de los datos obtenidos de los blancos. Se mejorará a su vez, el módulo de integración de pulsos para su mejor comprensión y se añadirá un módulo de compresión de pulsos tanto en frecuencia como en fase.

En el ámbito de la Armada, este simulador pretende acercar a los alumnos, futuros oficiales, suboficiales y tropa, a este sistema tan utilizado hoy día para la detección de blancos, desde la comodidad de su propio ordenador, y así mejorar el adiestramiento del personal que lo use, antes de su embarque.

La estructura que se va a seguir en el presente Trabajo de Fin de Grado es la siguiente:

- El estado del arte donde se hará un estudio de otros simuladores y se evaluarán sus diferencias con el que se va a desarrollar y así, confirmar que este trabajo mejorará el aprendizaje y la formación en este campo de estudio. Posteriormente, se desarrollará la teoría radar y los cimientos básicos que la componen. Además, se detallarán los parámetros fundamentales y los módulos que estos sistemas tienen para mejorar sus prestaciones.
- El desarrollo del TFG donde se abarcará lo reseñado en los objetivos, realizando todas las funciones, y todo el código necesario en MATLAB, generando en última instancia, la interfaz gráfica donde el usuario podrá adquirir los conocimientos precisos en el ámbito de los radares pulsados.
- En el apartado de resultados y validación, se desarrollará el manual de usuario de este software, donde se detallarán todas las opciones de configuración y parámetros a modificar por el operario.
- En la conclusión, se abordarán cuestiones sobre los resultados obtenidos, la experiencia desarrollada y las posibles líneas de investigación para futuros proyectos.

En cuanto a las herramientas a emplear en el desarrollo de este trabajo caben destacar la suite matemática MATLAB, y su opción para crear interfaces gráficas, donde se puede optar por una opción más visual y creativa del proyecto a desarrollar, y así facilitar su estudio y aprendizaje.

## 2 ESTADO DEL ARTE DE LOS SIMULADORES RADAR

### 2.1 Simuladores radar comerciales

Existen actualmente en el mercado multitud de simuladores radar de diferentes marcas y proveedores. Estos permiten a los usuarios mejorar sus habilidades de cara a su posterior uso a bordo de los buques, adiestramiento a estudiantes de navegación, marinos civiles y militares.

Entre los principales simuladores radar se encuentra el *SPx Radar Simulator* de los desarrolladores de *Cambridge Pixel Ltd*. Este sistema se basa en generar datos de vídeo radar y la combinación de trazas estáticas o siguiendo un patrón de movimiento. Como función principal, sirve como herramienta para la creación de simulaciones complejas de multitud de blancos permitiendo a los sistemas ser comprobados antes de su puesta en marcha con datos reales. Además, también incorpora un modo de entrenamiento para el adiestramiento de los operadores. En la Figura 2-1 se muestra una previsualización del simulador comentado.

Como características principales de este simulador caben destacar, señales recibidas al radar en función de datos de elevación del terreno, de blancos con parámetros modificables por el usuario como la RCS. El usuario es capaz de modificar el PRF, la velocidad de rotación y el ancho de banda de la antena, y se pueden observar los cambios en la detección que esas modificaciones provocan. Además, es posible editar el escenario donde transmite el radar teniendo en consideración para la detección, el ruido térmico, el *clutter* y las pérdidas en blancos fluctuantes.

Otro de los simuladores más reconocidos es el *PCRadar* de la empresa *Buffalo Computer Graphics*, que simula una pantalla del radar ARPA en el monitor del ordenador. En la Figura 2-2 se observa este simulador en funcionamiento.

Esta herramienta mejora el adiestramiento de aquellos estudiantes en el campo de la navegación y para prevenir en un futuro los abordajes en la mar. El programa incorpora simulación realista del medio, los blancos, el *clutter* y otros efectos visuales y tiene además la capacidad de usar líneas de demora electrónicas (EBL) y marcadores de distancias variables (VRM) como ayudas a la navegación de precisión por aguas restringidas.

Permite a su vez, diferentes formas de presentación PPI, la adquisición automática de blancos y la posibilidad de cambiar algunos parámetros del radar como es la ganancia. Y dispone, además, de un sistema de alertas a la navegación para así formar a sus operarios, como objetivo fundamental.

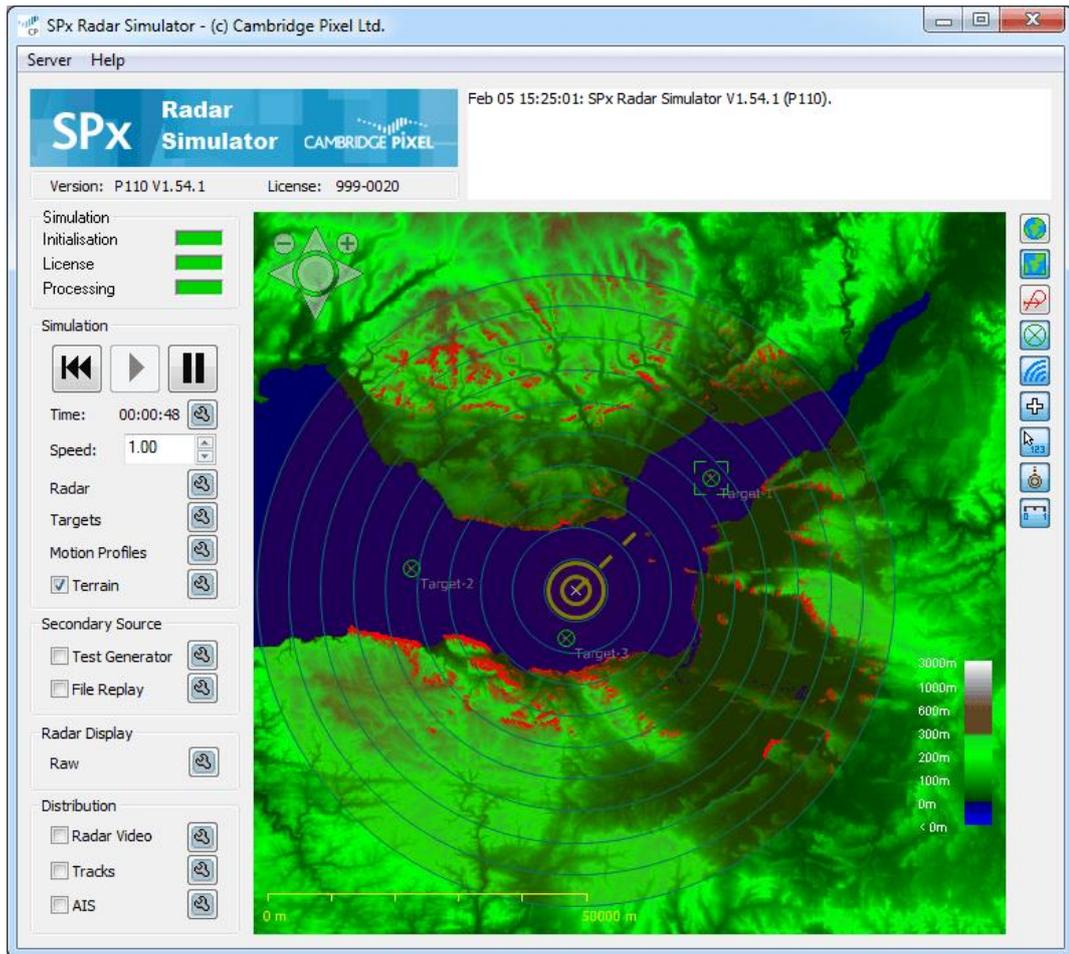


Figura 2-1 SPx Radar Simulator

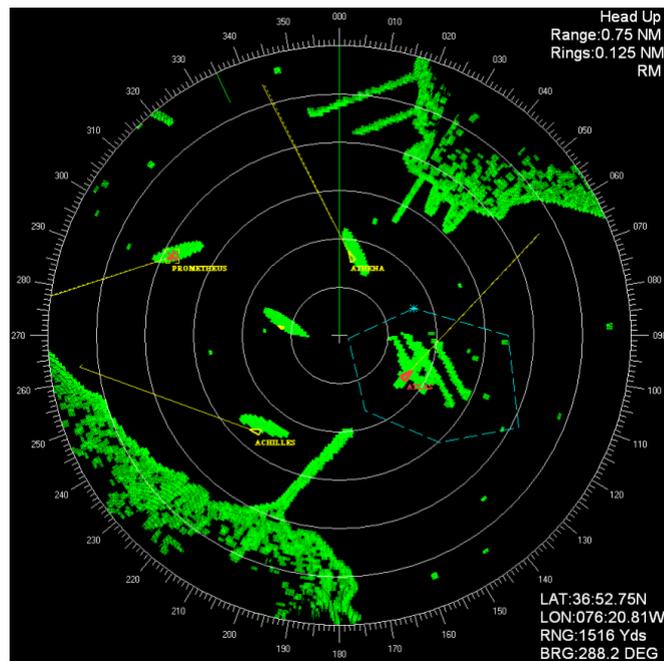


Figura 2-2 PCRadAR ARPA Radar Display

## 2.2 Simuladores docentes actuales

El objetivo de este TFG, como se ha mencionado previamente, es mejorar el simulador SimRAD, que es un TFG realizado en el Centro Universitario de la Defensa (CUD) por el entonces AN Santiago De León De León y la Prof. Dra. Paula Gómez Pérez, que se realizó con la intención de mejorar el adiestramiento en el ámbito del uso del radar y, facilitar su aprendizaje de una forma práctica, siendo capaces de visualizar lo que hace realmente este sistema, aunque de forma muy simplificada.

Este simulador se basa en el lenguaje de programación Matlab, y permite a los usuarios entender de forma sencilla y visual el funcionamiento básico de un radar pulsado, además de servir como herramienta docente donde los alumnos pueden configurar parámetros fundamentales, como son los datos del transmisor, los datos del receptor y por último los datos de los blancos. Y de esta forma, observar como estos parámetros afectan a la detección de los mismos.

En la Figura 2-3 se observa la pantalla principal del simulador. En la parte superior se ubica el área de introducción de los datos del radar, como pueden ser la potencia transmitida, el PRI, el ancho de pulso, la ganancia y la eficiencia de integración. A la derecha se encuentran los datos de los blancos a configurar, que son la RCS y su distancia. Por último, abajo se realizan los cálculos pertinentes y los representa con una serie de gráficas a la izquierda. Si hiciese falta alguna aclaración, se indicaría en el apartado de observaciones.

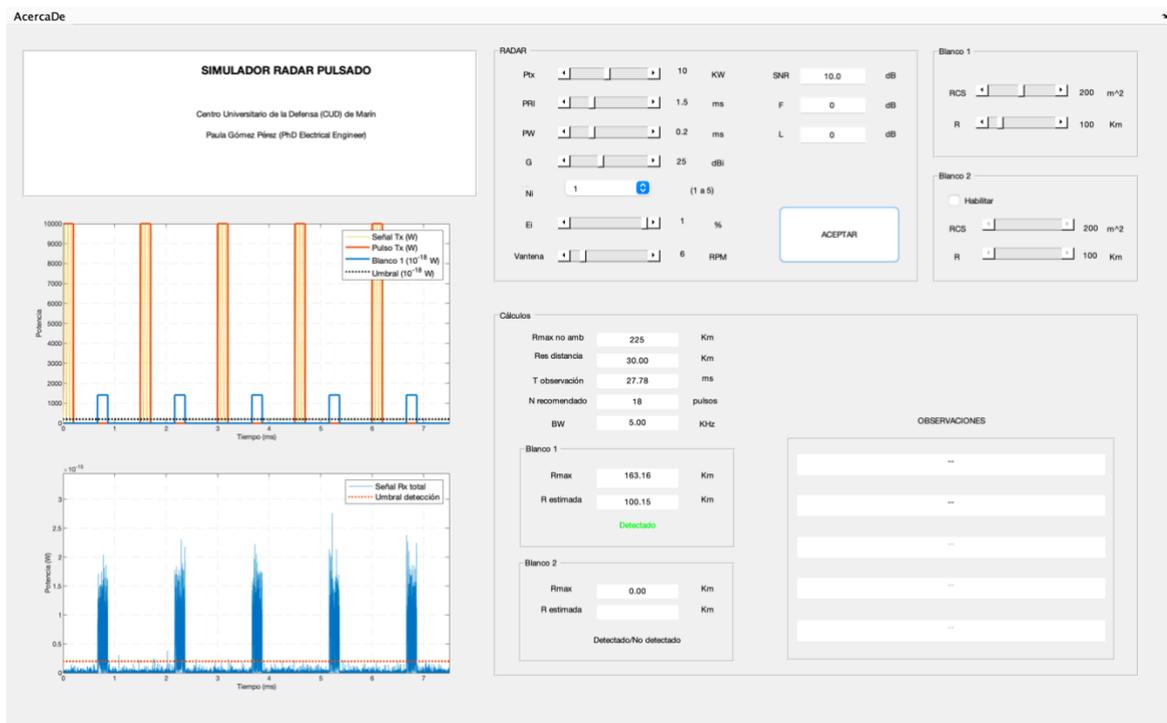


Figura 2-3 SimRAD TFG

Este simulador es muy sencillo, sin demasiadas opciones de configuración y en una única ventana. El módulo de integración es muy simple, y por motivos de visualización sólo permite integrar hasta cinco pulsos. La representación de las señales es muy básica, donde se imprimen en pantalla el tren de pulsos transmitido y el recibido re-radiado por los blancos. Además, carece de compresión de pulsos por lo que la resolución en distancia es pobre, de forma que dos blancos muy próximos serían difícilmente detectables por separado.

Existe adicionalmente un simulador de un radar de onda continua con características y funcionalidades similares a éstas, en el que no se va a entrar en detalle, dado que se escapa del ámbito de aplicación de este TFG.

En la actualidad, existe un segundo simulador radar, creado por el Prof. Dr. del CUD Alfonso R. Molares, basado en otro lenguaje de programación y mejora la mayoría de las características de su predecesor. Este simulador incorpora una gran pantalla PPI como se puede ver en la Figura 2-4, donde se representan los blancos radar de los blancos y el haz transmitido que gira en función de la velocidad de rotación de la antena. A la derecha de la interfaz, se indican los diferentes parámetros que son modificables por el usuario, como son la potencia mínima de detección, datos del transmisor y de la antena, etc.

En la parte inferior, se representa la gráfica de la señal recibida junto con el umbral de detección, pudiendo discriminar en tiempo real de si se tratan (o no) de falsas alarmas causadas por el ruido.

La posición del blanco se puede modificar directamente en la presentación radar PPI, y se puede apreciar las celdas de resolución de los blancos, en las que, si dos blancos están muy próximos entre sí, no pueden ser discriminados en distancia ni en ancho de haz.

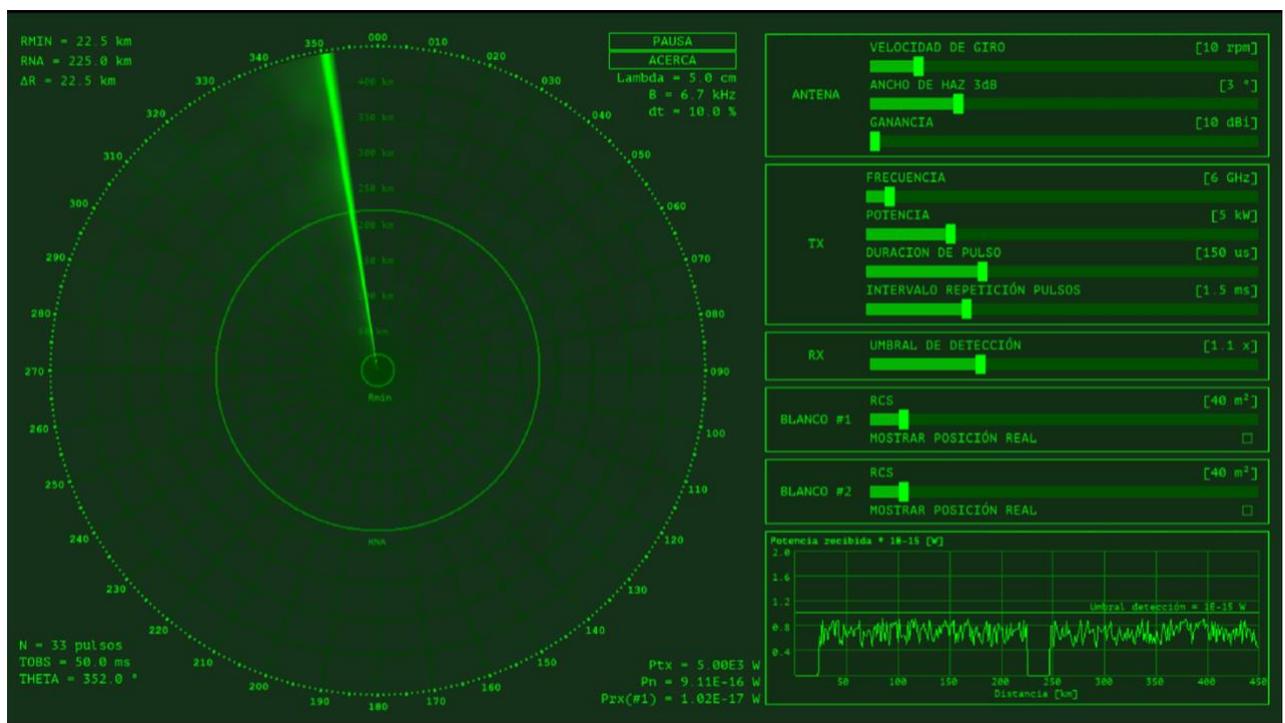


Figura 2-4 Simulador radar docente actual

Este simulador no refleja las distancias máximas y mínimas de detección que, en el caso de un radar pulsado, pueden tratarse casi con seguridad, referentes al horizonte radar y la curvatura de la tierra y a la duración del pulso transmitido, respectivamente.

El módulo de integración funciona correctamente, y se aprecia con claridad que, si tenemos un mayor número de pulsos integrados, aumenta nuestra probabilidad de detección. Sin embargo, este simulador no contempla la modificación de este módulo, así como no permite cambiar entre integración coherente e incoherente. Tampoco permite variar la eficiencia de integración ni observar cómo funciona pulso a pulso.

Asimismo, y al igual que el anterior, carece de compresión de pulsos y análisis de perfiles de alta resolución.

## 2.3 Necesidad TFG

En general, tras analizar los diferentes simuladores comerciales y docentes, se llega a la conclusión que hace falta un simulador que acerque al funcionamiento interno de un sistema radar al usuario que lo

utilice. Los simuladores previamente comentados se limitan a mejorar el adiestramiento de los operadores en el ámbito de la navegación, y la ayuda que este sistema, gracias a su exhaustivo conocimiento, puede lograr.

Sin embargo, ninguno permite comprobar el funcionamiento interno del mismo de forma gráfica, que ayuden a la comprensión de cada uno de los bloques que conforma un sistema radar. Debido a esto, se ve la necesidad de crear un simulador que consiga inculcar los conceptos básicos, las partes fundamentales que conforman un sistema radar de pulsos, y cómo éste funciona bloque a bloque en profundidad.

Para ello, este TFG presenta un simulador que logra implementar un módulo de procesado de señal, además de una interfaz gráfica mejorada donde se pueda visualizar la señal transmitida y recibida. Éste consta de un módulo de integración, que puede ser coherente e incoherente, un módulo de compresión de pulsos, tanto en frecuencia como en fase y la implementación de un filtro adaptado, para conseguir simular un radar lo más parecido a la realidad.

Los simuladores que se han mencionado y los comerciales a la venta, disponen de un módulo de integración donde automáticamente, en el momento de la detección de blancos, éste funciona, pero en este nuevo concepto de simulación se consigue que se refleje con una serie de gráficos, cómo la señal recibida va aumentando proporcionalmente al número de pulsos, permitiendo así, ver cómo la señal supera la potencia mínima de detección. Este tipo de representaciones ayuda a un usuario neófito a comprender la importancia de este tipo de bloques, así como la diferencia entre diferentes tipos de procesado de señal.

Lo mismo ocurre con la compresión de pulsos, donde los simuladores convencionales no permiten elegir el tipo de compresión ni cambiar ningún parámetro relacionado, únicamente se puede observar que el radar dispone de buena resolución en la detección de blancos. Gracias a este simulador, es posible configurar el módulo de compresión, como es el tipo y la ganancia, para conseguir una resolución determinada o incluso para comprobar cómo una configuración errónea (como una mala selección del código utilizado en la compresión de fase) puede llegar a degradar la resolución del sistema.



## 3 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS RADAR

### 3.1 Introducción

El concepto básico del radar fue descubierto por el físico alemán Heinrich Hertz entre los años 1885 y 1888 [1]. Hertz confirmó experimentalmente las teorías del campo electromagnético de James Clerk Maxwell, publicadas en 1864, demostrando que las ondas electromagnéticas tienen las mismas propiedades que las ondas luminosas, y que, por tanto, se podían reflejar en superficies metálicas. Posteriormente, y gracias al trabajo de Hertz, otro alemán, Christian Hülsmeier construyó lo que hoy día se conoce como, el antecesor de un radar pulsado monoestático. Este radar detectaba barcos y fue comercializado gracias a que ayudaba a prevenir los abordajes en la mar. Durante los años 20, otro científico importante que apoyó al descubrimiento del radar, Marconi, pionero de los sistemas radio inalámbricos, observó la detección de los blancos en sus experimentos. En la próxima década, se desarrollaron otros sistemas de detección de blancos a corta distancia [1].

Entre los principales orígenes del radar, cabe destacar la batalla de Inglaterra donde la Alemania nazi tenía un poder armamentístico realmente mayor, en especial, la capacidad aérea. Por lo tanto, Inglaterra, pensando cómo vencer dicha fuerza aérea, puso todos sus esfuerzos en la creación de un sistema de alerta temprana [2]. Fue entonces, cuando gracias a Watt, que pensaba que con la ayuda del eco radioeléctrico se podrían localizar aviones con antelación, se creó lo que en la actualidad se denomina como el primer radar de pulsos. Mediante el uso de este reciente sistema se pudieron combatir con éxito los devastadores ataques aéreos de Alemania durante la guerra [3]. Con la creación del magnetrón, los británicos consiguieron un avance decisivo en el campo de la técnica de radar. El nuevo tubo de gran capacidad producía impulsos de radar altamente energéticos con longitudes de onda muy cortas lo que permitía la construcción de aparatos pequeños pero muy potentes. Incorporados a los aviones, el haz dirigido altamente concentrado giraba sobre un eje y plasmaba el paisaje, aparte de los barcos y aviones [4] [5].

La navegación de noche o en condiciones de baja visibilidad dejó de ser un problema. Desde 1945, los principios de la técnica de radar no se han visto modificados; con el aumento del tráfico aéreo se hace indispensable su uso para tener un minucioso control de todo movimiento.

En el ámbito militar, también se ha llegado a un gran perfeccionamiento en la técnica del radar, siendo ésta cada vez más sofisticada, gracias también a la evolución del procesado de imágenes, de las señales y de los datos recogidos.

Estos sistemas atienden a diferentes tipos de clasificaciones dependiendo de la plataforma donde estén instalados (satelitales, en aeronaves, en buques, ...), el tipo de blancos que se pretende detectar (de superficie, aéreos, ...), la banda de frecuencia en la que trabajan (UHF, microondas, ...), el tipo de antena, o el tipo de forma de onda utilizada. También, se pueden clasificar según la misión o función

que desempeñan, como son los radares meteorológicos, de seguimiento, direcciones de tiro, alerta temprana, etc.

Sin embargo, la clasificación más ampliamente extendida es según la **forma de onda**. Partiendo de este criterio, los sistemas radar se pueden clasificar en dos grandes familias: Radares de Onda Pulsada (*Pulsed Wave Radar*, o PW Radar), o Radares de Onda Continua (*Continuous Wave Radar* o CW Radar).

Los **radares de onda pulsada** usan un tren de pulsos como forma de onda, enviando señales de potencia elevada en intervalos de tiempo muy cortos, pero que se suceden en lo que se denomina una *ráfaga* (tren de pulsos enviados en una misma dirección del espacio).

Por otro lado, se encuentran los **radares de onda continua** en los que se transmite una misma señal de forma ininterrumpida, y, por lo tanto, utilizan antenas separadas para transmisión y recepción. Estos radares pueden medir con precisión la velocidad radial del blanco, pero no permiten medir la distancia al mismo sin utilizar algún tipo de modulación.

Este trabajo fin de grado tiene como objetivo último la consecución de un radar de onda pulsada de alta resolución, por lo que, en adelante, tan sólo se hará referencia a este tipo de sistemas.

### 3.2 Parámetros fundamentales Sistemas Radar Pulsado

En este apartado se van a definir los parámetros fundamentales que caracterizan a un radar pulsado y a su forma de onda. Estos radares calculan la distancia mediante la medición del tiempo que tarda un pulso en recorrer el viaje de ida y vuelta hasta el blanco.

#### 3.2.1 Distancia al blanco

La distancia que separa un blanco del transmisor se define como el producto de la velocidad de la luz, ya que las ondas electromagnéticas se desplazan a esta velocidad, y el tiempo que tarda en reflejarse en el blanco y volver al sistema radar.

Debido a que la antena transmisora y receptora están situadas en el mismo lugar, la distancia que detecta es dos veces la distancia al blanco, y es por ello que dicha distancia debe corregirse siguiendo la Ec. (3-1)

$$R = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (3-1)$$

#### 3.2.2 PRI, PRF y ciclo de trabajo

Dan nombre al Periodo de Repetición de Pulsos (*Pulse Repetition Interval*, PRI) y Frecuencia de Repetición de Pulsos (*Pulse Repetition Frequency*, PRF) respectivamente. Son dos parámetros fundamentales para la comprensión de este tipo de sistemas. Uno es el inverso del otro. El PRI se mide en unidades de tiempo (s) y el PRF en unidades de frecuencia ( $s^{-1}$  o Hz).

El PRI es la suma del ancho del pulso transmitido (denominado  $\tau$ ) y el tiempo de escucha ( $t_{escucha}$ ), que es el tiempo en el que el radar no está transmitiendo, sino que se dedica a procesar los ecos recibidos. Si el ancho de pulso es significativamente menor que el tiempo de escucha, este último se puede aproximar al PRI (Ec. (3-2)).

$$PRI = \tau + t_{escucha} \approx t_{escucha} \text{ si } \tau \ll t_{escucha} \quad (3-2)$$

$$PRF = \frac{1}{PRI} \quad (3-3)$$

Asimismo, al igual que la frecuencia de una señal es la inversa de su período, el PRF es la inversa del PRI, como se muestra en la Ec. (3-3). El ancho de pulso y el PRI se relacionan entre sí a través del *ciclo de trabajo* (*Duty Cycle, d<sub>c</sub>*), que representa el porcentaje de tiempo que el radar está transmitiendo dentro de un período de la señal (Ec.(3-4)).

$$d_c = \frac{\tau}{PRI} \quad (3-4)$$

Los valores que suelen ser modificables en los radares son el PRF, y en ocasiones, el ciclo de trabajo y (menos frecuentemente, al menos de forma directa), el ancho de pulso.

### 3.2.3 Alcance máximo del sistema

El alcance máximo del sistema se define como el mínimo valor de todas las distancias que intervienen en el radar, como se indica en la Ec. (3-5).

$$R_{max} = \min(R_{maxNA}, R_{maxHR}, R_{maxAR}, R_{maxESCALA}) \quad (3-5)$$

Donde:

$R_{maxNA}$  es la distancia máxima no ambigua,

$R_{maxHR}$  es la distancia máxima por horizonte radar,

$R_{maxESCALA}$  es la escala seleccionada.

El valor de la  $R_{maxAR}$  se definirá posteriormente, con la ecuación radar.

A continuación, se describirán cada una de estas distancias en detalle.

#### 3.2.3.1 Alcance máximo no ambiguo

Como indica la misma palabra es la distancia aquella a la que el sistema radar es capaz de visualizar un blanco sin ambigüedad. La ambigüedad puede ser en amplitud o en distancia dependiendo de su posición con respecto al pulso transmitido, es decir, del PRI.

Por lo tanto, esta distancia se define según la Ec. (3-6).

$$R_{m\acute{a}xNA} = \frac{c \cdot (PRI - \tau)}{2} \quad (3-6)$$

Y si se aproxima de igual forma,

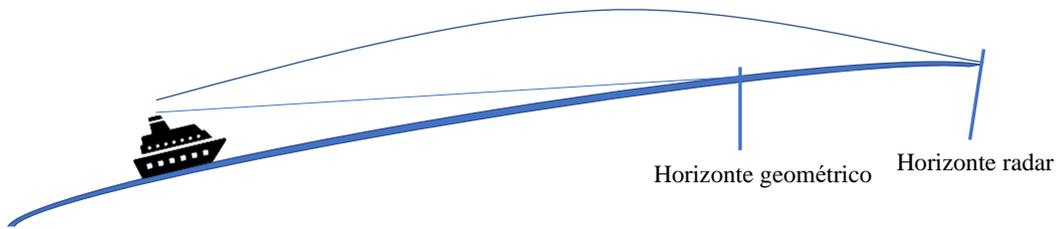
$$R_{m\acute{a}xNA} = \frac{c \cdot PRI}{2} \quad (3-7)$$

#### 3.2.3.2 Alcance máximo por horizonte radar

Al igual que a la vista humana, a la visión de los sistemas radares también les afecta la curvatura de la tierra y, por tanto, su distancia máxima de detección. Ésta depende únicamente de la altura de la antena transmisora y de la receptora. [6] Si se traza una recta tangente a la superficie terrestre, queda determinado el horizonte geométrico, como se observa en la Figura 3-1. El horizonte radar no es el mismo que el horizonte geométrico (óptico) porque las ondas electromagnéticas siguen la curvatura de

la tierra hasta cierto punto debido al fenómeno conocido como refracción. La Ec. (3-8) proporciona una buena aproximación al alcance máximo por horizonte radar, medido en millas náuticas, como viene siendo habitual en los sistemas que analizaremos en este TFG.

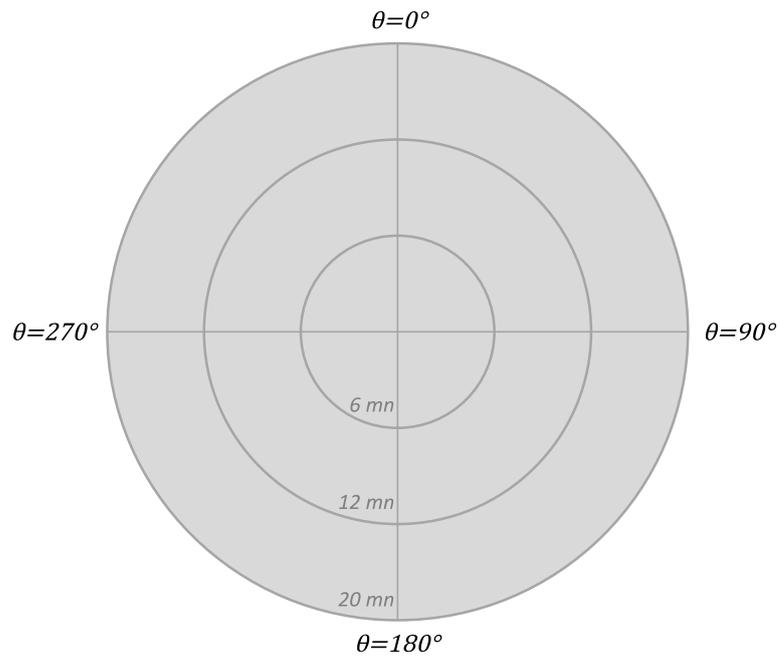
$$R_{m\acute{a}x_{HR}}(MN) \cong 2'2 \cdot (\sqrt{h_{TX}(m)} + \sqrt{h_{RX}(m)}) \tag{3-8}$$



**Figura 3-1 Horizonte geométrico y horizonte radar**

### 3.2.3.3 Alcance máximo por escala radar

El valor de la  $R_{maxESCALA}$  dependerá de la escala que manualmente escogerá el operario. En la Figura 3-2 se observa un ejemplo de escala 20 mn.



**Figura 3-2 Escala Radar**

### 3.2.4 Alcance mínimo del sistema

El alcance mínimo del sistema se define como el máximo de los valores de distancia que figuran en la Ec. (3-9).

$$R_{min} = máx(R_{min\tau}, R_{min\theta_v}) \tag{3-9}$$

### 3.2.4.1 Alcance mínimo por ancho de pulso

En los sistemas monoestáticos que únicamente disponen de una antena para transmitir y recibir, mientras el sistema radar transmite un pulso, éste no será capaz de escuchar y, por lo tanto, se define la distancia mínima como se muestra en la Ec. (3-10).

$$R_{min\tau} = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad (3-10)$$

### 3.2.4.2 Alcance mínimo debido al ancho de haz vertical

Debido al ancho de haz vertical, se forma un cono de silencio alrededor del sistema de detección, en el cual no el sistema radar no es capaz de detectar ningún blanco.

$$R_{min\theta_v} = \frac{h_{TX}}{\tan\left(\frac{\phi_v}{2}\right)} \quad (3-11)$$

## 3.2.5 Resolución Radar

### 3.2.5.1 Resolución acimutal

Es la mínima distancia angular a la que pueden estar dos blancos para ser distinguidos sin ambigüedad.

$$\delta(m) = \theta_H(rad) \cdot R(m) \quad (3-12)$$

### 3.2.5.2 Resolución longitudinal

Es la mínima distancia a la que pueden estar dos blancos para ser distinguidos sin ambigüedad,

$$\Delta R = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad (3-13)$$

Al conjunto de estos dos conceptos se le denomina celda de resolución, es decir, la celda que forman la resolución angular y la resolución longitudinal.

## 3.2.6 Velocidad de rotación y tiempo de observación

La velocidad de rotación de la antena se define como la relación entre el ancho de haz horizontal medido y el tiempo de observación, como se indica en la Ec. (3-14). Este último se define como el producto del número de pulsos transmitidos y el PRI. (Ec. (3-15))

$$\omega = \frac{\theta_H(rad)}{t_{obs}(s)} \quad (3-14)$$

$$t_{obs} = N_p \cdot PRI \quad (3-15)$$

$$N_p = \frac{\theta_H}{PRI \cdot \omega} \quad (3-16)$$

### 3.2.7 Potencia y energía

La potencia media es el producto de la potencia máxima transmitida y el ciclo de trabajo. (Ec. (3-17)) Y la energía transmitida es el área bajo el pulso, es decir, el producto del ancho de pulso y la potencia máxima. (Ec. (3-18))

$$P_{av} = P_{m\acute{a}x} \cdot \frac{\tau}{PRI} \quad (3-17)$$

$$Energ\acute{a} (J) = \tau \cdot P_{m\acute{a}x} \quad (3-18)$$

## 3.3 Ecuación de alcance radar

La ecuación radar es la base fundamental de la teoría radar. Ésta relaciona el alcance radar con las características del transmisor, receptor, la antena, el blanco y el entorno. Permite obtener la distancia a la que se encuentra un blanco, mediante la relación entre la potencia transmitida y la potencia recibida. Además, también sirve como herramienta de ayuda en el diseño de este tipo de sistemas.

Considerando un radar con antena isotrópica, se define la densidad de potencia a una distancia R como la relación entre la potencia transmitida y el área de una esfera de radio R.

La densidad de potencia a una distancia R se define según la Ec. (3-19).

$$P_D \left( \frac{W}{m^2} \right) = \frac{P_t}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (3-19)$$

Donde:

$P_D$  es la densidad de potencia,

$P_t$  es la potencia transmitida,

La densidad de potencia se mide en vatios por metro cuadrado (W/m<sup>2</sup>).

Sin embargo, los radares usan antenas direccionales para concentrar la potencia transmitida en una dirección. La ganancia de una antena ( $G$ ) es la relación de la densidad de potencia radiada en esa dirección desde una antena direccional con respecto a la densidad de potencia en esa dirección desde una antena isotrópica. Se define como indica la Ec. (3-20).

$$G = \frac{P_D \text{ máx radiada por una antena direccional}}{P_D \text{ radiada por una antena isotrópica en esa dirección}} \quad (3-20)$$

A un blanco le incide una cantidad de energía y ésta se refleja en varias direcciones. Para la detección del mismo solo hay que tener en cuenta la cantidad de potencia re-radiada en la dirección del radar. La RCS afecta a la densidad de potencia devuelta al radar. Éste se define según la Ec. (3-21).

$$\text{Densidad de potencia devuelta al radar} = \frac{P_t \cdot G}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \frac{\sigma}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (3-21)$$

La RCS se mide en unidades de área ( $m^2$ ), pero no se puede confundir ésta con el tamaño físico del blanco, sino que más bien, ésta se relaciona con la forma del blanco.

La potencia recibida se define como el producto de la densidad de potencia y el área efectiva  $A_e$  de la antena receptora. El área efectiva está relacionada con el área física y la eficiencia de apertura de la antena. (Ec. (3-22))

$$A_e = \rho_a \cdot A \quad (3-22)$$

Donde:

$A$  es el área física de la antena,

$A_e$  es el área efectiva,

$\rho_a$  es la eficiencia de apertura de la antena.

La distancia máxima por alcance radar es la distancia en la que el blanco no puede ser detectado. Ocurre cuando la potencia recibida del blanco es igual al umbral de potencia mínima detectable por el sistema ( $S_{min}$ ), por lo que, sustituyendo la  $P_r$  por la  $S_{min}$ , ésta se define como se indica en la Ec. (3-23).

$$R_{maxAR} = \left[ \frac{P_{TX} \cdot G \cdot A_e \cdot \sigma}{(4\pi)^2 \cdot S_{min}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3-23)$$

Los parámetros de la antena más importantes son la ganancia del transmisor y el área efectiva del receptor. En el caso del radar monoestático, la antena transmisora y la receptora es la misma y, por lo tanto, se relacionan en la Ec. (3-24).

$$G = \frac{4 \cdot \pi \cdot A_e}{\lambda^2} \quad (3-24)$$

Donde,

$\lambda$  es la longitud de onda.

$A_e$  es el área efectiva de la antena receptora.

Despejando el área efectiva de la Ec. (3-22), y al sustituirla en la Ec. (3-23), se obtiene la ecuación de alcance radar. (Ec. (3-25))

$$R_{maxAR} = \sqrt[4]{\frac{P_{TX} \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot L_T \cdot S_{min}}} \quad (3-25)$$

Donde:

$P_{tx}$  es la potencia pico transmitida.

$G$  es la ganancia de la antena.

$\lambda$  es la longitud de onda.

$S_{min}$  es la sensibilidad del sistema radar.

$\sigma$  es la RCS del blanco, que se detallará posteriormente en el apartado 3.3.2.

$L_T$  son las pérdidas totales del sistema, que se detallará posteriormente

### 3.3.1 Sensibilidad y Relación Señal a Ruido

Exceptuando la RCS del blanco, el resto de parámetros de la Ec. (3-25), dependen exclusivamente del diseño del radar. La detección entonces tendrá lugar cuando cierto valor de potencia recibida supere el umbral de detección, o sensibilidad del sistema.

En la práctica, la señal reflejada en el blanco en dirección devuelta al radar, viene acompañada de ruido, que introduce niveles indeseados de potencia en todas las frecuencias del sistema. Si el radar operase en un ambiente totalmente libre de ruido, es decir, que no hubiese fuentes externas de ruido acompañando a la señal del blanco, y que el receptor fuese tan perfecto que no generase ruido alguno, aun así, existiría ruido debido a la agitación térmica en la entrada del receptor, inherente a todos los sistemas electrónicos. A este ruido se denomina ruido térmico y es proporcional al ancho de banda y a la temperatura del circuito de entrada, tal y como se refleja en la Ec. (3-26).

$$N = k \cdot T \cdot B \quad (3-26)$$

Donde,

$k$  es la constante de Boltzmann,  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K.

$B$ , es el ancho de banda de ruido, en Hz.

$T$ , temperatura absoluta en Kelvin.

El ancho de banda de la ecuación anterior hace referencia al ancho de banda de ruido que no es el mismo que el ancho de banda a 3dB [1]. Sin embargo, el ancho de banda a 3dB es una buena aproximación para los receptores radar porque en la práctica, la potencia de ruido en el receptor es mayor que el ruido térmico. La fiabilidad de un receptor radar está íntimamente relacionada a su figura de ruido,  $F$ , que se define como la relación entre las relaciones señal a ruido (o SNR, *Signal to Noise Ratio*) a la entrada y a la salida del receptor. (Ec. (3-27))

$$F = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}} \quad (3-27)$$

Donde:

$SNR_{in}$  es la relación señal a ruido a la entrada del receptor,

$SNR_{out}$  es la relación señal a ruido a la salida del receptor.

Como muestra la Ec. (3-27), la figura de ruido puede ser interpretada como la degradación de la SNR cuando la señal pasa por el receptor.

Si la  $S_{min}$  es la señal mínima de detección, sería la  $S_{in}$  de la  $SNR_{min}$  y, por lo tanto:

$$S_{min} = k \cdot T_0 \cdot B \cdot F \cdot (SNR_{out})_{min} \quad (3-28)$$

Donde,  $kT_0$  es un factor de aproximación, cuyo valor es de  $4 \times 10^{-21}$  W/Hz.

Sustituyendo el umbral de detección hallado en la Ec. (3-28) en la Ec. (3-25), resulta la denominada ecuación del alcance radar simplificada.(Ec. (3-29)) [1]

$$R_{maxAR} = \sqrt[4]{\frac{P_{TX} \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot L_T \cdot k \cdot T_0 \cdot B \cdot F \cdot (SNR)_{min}}} \quad (3-29)$$

La ventaja del uso de esta ecuación es que la  $(SNR)_{min}$  es independiente del ancho de banda y de la figura de ruido y depende exclusivamente de la probabilidad de detección y de la probabilidad de falsa alarma, dos parámetros que están relacionados con las necesidades del usuario.

### 3.3.2 Sección Radar (RCS, Radar Cross Section)

La Sección Radar, Superficie Equivalente Radar (SER) o RCS (*Radar Cross Section*) es una propiedad de un objeto reflectante, o de un blanco que se define como la relación entre la potencia re-radiada en la dirección del radar y la densidad de potencia incidente. [7]

$$\sigma = \frac{P_r}{P_D} m^2 \quad (3-30)$$

Donde, la RCS se representa con el símbolo  $\sigma$ , y se mide en unidades de área,  $m^2$ .

Aunque a veces la RCS se tome como una constante del blanco, ésta depende de diversos factores. Como son, la forma y los materiales del blanco, la frecuencia del radar y su polarización, y el ángulo de visión del radar. Los blancos cuyas superficies son planas pueden producir una RCS muy alta, mientras que las técnicas *stealth*, como son el uso de materiales absorbente radar y/o no metálicos, o la utilización de superficies inclinadas, pueden reducirla considerablemente.

La RCS de los blancos puede ser obtenida de forma empírica a partir de medidas o con modelos detallados por ordenador. Ambas aproximaciones son costosas ya que requieren descripciones detalladas del blanco y una gran cantidad de datos para las variaciones en frecuencia y en ángulo.

Cuando las ondas electromagnéticas inciden sobre un blanco, éstas son difractadas en todas las direcciones. En ellas, se encuentran las que tienen la misma polarización que la antena receptora y, por otro lado, las que tienen otra polarización diferente. La intensidad de la energía devuelta al radar con la misma polarización define la RCS de un blanco.

Las características de la RCS de un blanco son obtenidas por modelos simples. Como se muestra en la Figura 3-3, la RCS de un blanco no es constante con la frecuencia, sino que puede ser descrita en tres regímenes, dependiendo del tamaño relativo entre el blanco y la longitud de onda.

Región de Rayleigh: es la región donde el tamaño del blanco es mucho menor que la longitud de onda, y la RCS tiene una pequeña dependencia con el ángulo y varía considerablemente con la frecuencia.

Región de resonancia: en esta región el tamaño del blanco es comparable con la longitud de onda. La RCS fluctúa en el orden de los 10 dB con la frecuencia, y cambios bruscos en la forma del blanco puede producir variaciones en función del ángulo.

Región óptica: en esta región, el tamaño del blanco es muy grande comparado con la longitud de onda de la señal. Además, el movimiento de los blancos provoca un cambio del ángulo y debido a esto, un cambio en la RCS.

Sin embargo, en la actualidad, la mayoría de los radares operan en la banda de los GHz (cada vez a frecuencias mayores), por lo que se encuentran todos ellos en la región óptica. Ésta será la aproximación que se realizará para el desarrollo del presente trabajo.

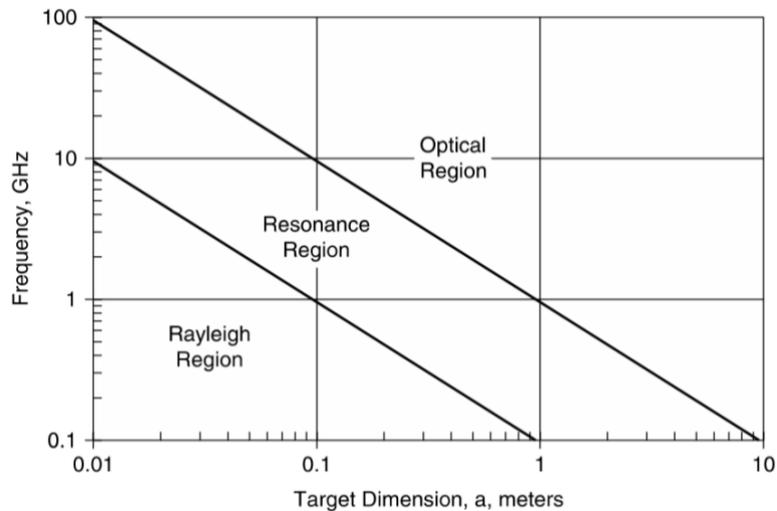


Figura 3-3: Dependencia de la RCS con la frecuencia [7]

### 3.3.3 Pérdidas del sistema

Además de considerar las pérdidas tanto en transmisión,  $L_{Tx}$  como en recepción,  $L_{Rx}$  hay que tener en cuenta las pérdidas producidas por las condiciones meteorológicas o posibles fluctuaciones de la RCS de los blancos, entre otras. A continuación, se detallarán las más relevantes.

#### 3.3.3.1 Pérdidas atmosféricas

Las pérdidas atmosféricas hacen referencia al efecto de la climatología en la propagación de la señal, siendo mayores cuanto más adversa sea. Según indica la ITU-R [8] [9] [10], estas pérdidas son proporcionales a una constante de atenuación atmosférica y a la distancia al blanco, en el caso que las condiciones sean las mismas en todo el espacio en el que se propaga la señal.

La atmósfera produce pérdidas en la propagación de la señal debido al efecto conocido como atenuación atmosférica. Estas pérdidas son causadas por la absorción molecular del oxígeno y del vapor de agua presente en la atmósfera. Éstas aumentan de forma proporcional a la frecuencia, en la región de las microondas, pero, sin embargo, disminuye con la altitud, pudiendo considerarse despreciables a más de 10 km. Para radares de superficie, la atenuación disminuye con el aumento del ángulo de elevación, y puede despreciarse por encima de los 10 grados.

Las pérdidas atmosféricas aumentan de forma exponencial a la distancia al blanco a detectar y a una constante de atenuación expresada en dB por km, como se indica en la Ec. ( 3-31).

En unidades logarítmicas:

$$L_{atm} = 2 \cdot \alpha \cdot R \quad (3-31)$$

Y expresada en unidades naturales:

$$l_{atm} = 10^{\frac{2 \cdot \alpha \cdot R}{10}} \quad (3-32)$$

Donde:

$\alpha$  es la constante de atenuación atmosférica,

$R$  es la distancia al blanco.

### 3.3.3.2 Blancos Swerling

Los blancos Swerling se modelan como unas pérdidas para así facilitar el posterior cálculo del alcance radar. Estas pérdidas dependen del tipo de blanco fluctuante, la probabilidad de detección y del número de pulsos transmitidos.

En la Figura 3-4 se refleja que las pérdidas por fluctuación dependen del número de pulsos integrados, de la probabilidad de detección, de la probabilidad de falsa alarma y del tipo de blanco Swerling que sea, que se definirán posteriormente en el apartado 3.3.3.2.

Los modelos de fluctuación de los blancos Swerling pueden usar dos tipos de decorrelación de la RCS. Correlación durante una ráfaga será el caso donde todos los pulsos devueltos durante un tiempo de observación están correlados entre sí, pero decorrelados con otros períodos de observación.

El otro tipo de decorrelación es pulso a pulso, es decir, que todos los pulsos devueltos al radar son decorrelados.

Existen cuatro tipos de blancos Swerling dependiendo del blanco y de la decorrelación. Se exponen en la Tabla 3-1.

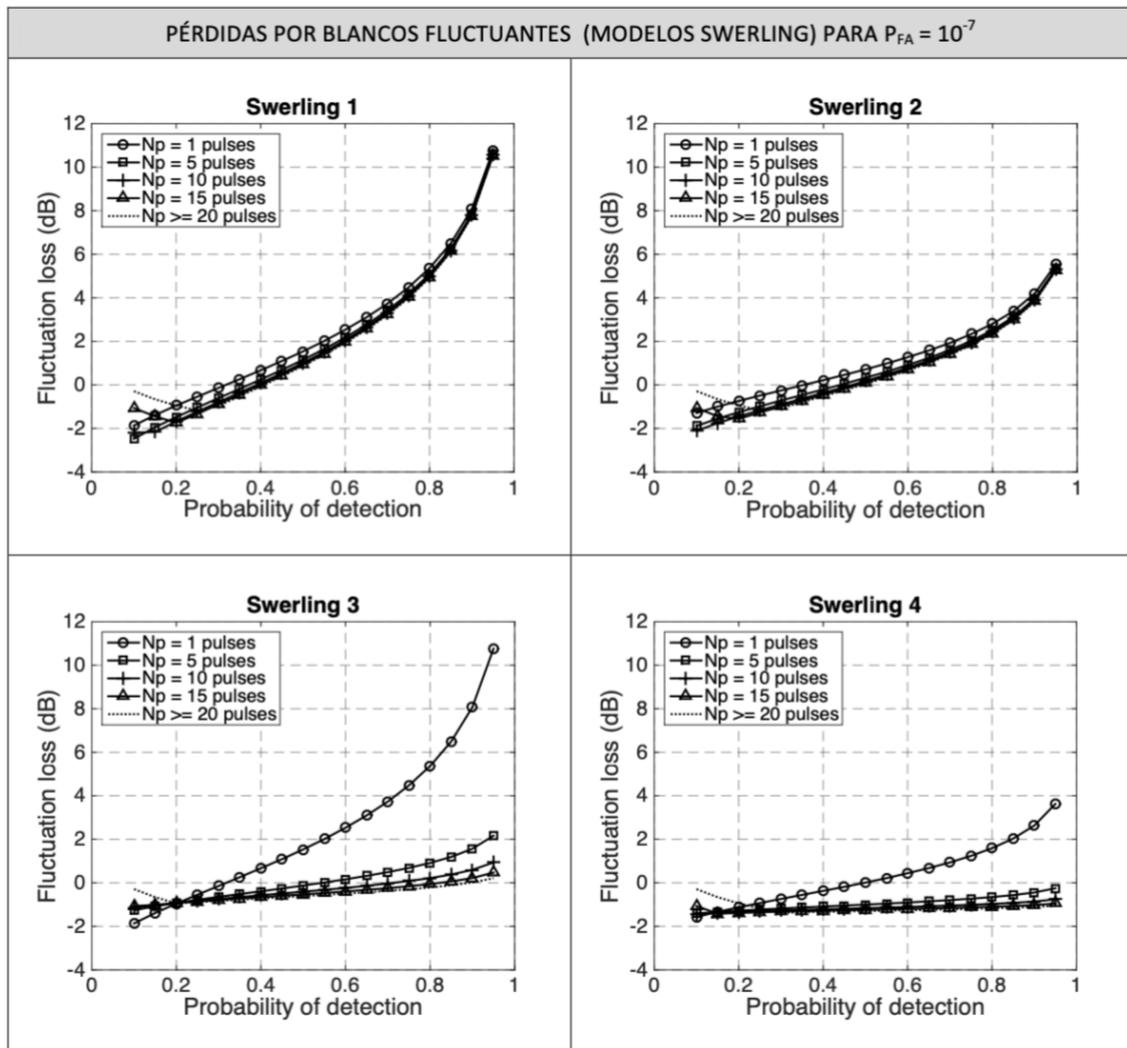


Figura 3-4 Ejemplo Pérdidas SWERLING

Tipo de blanco	Correlado durante ráfaga	Decorrelado pulso a pulso
Muchos dispersores iguales	Swerling 1	Swerling 2
Un dispersor dominante y muchos pequeños	Swerling 3	Swerling 4
No fluctuantes	Swerling 0 o 5	

Tabla 3-1 Modelos de RCS de blancos fluctuantes

### 3.3.3.3 Cómputo de las pérdidas totales del sistema

Para facilitar el cálculo del alcance radar, las pérdidas de todo el sistema se agrupan en un mismo parámetro. Siendo ésta la suma en unidades logarítmicas.

$$L_T = L_{Tx} + L_{Rx} + L_{atm} + L_{SW} \quad (3-33)$$

## 3.4 Procesado de señal en sistemas radar pulsados

La Figura 3-5 describe el diagrama de bloques simplificado de un sistema radar genérico, de tipo pulsado y monoestático, donde se aprecia el bloque de generación de la onda, a partir de un oscilador local controlado por tensión (VCO, *Voltage-Controlled Oscillator*).

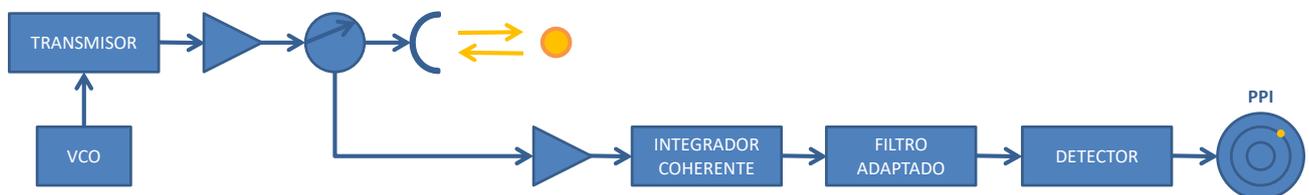


Figura 3-5: Diagrama de bloques sistema radar pulsado

En este diagrama cabe destacar el bloque del filtro adaptado, porque es el que marca el antes y el después en la recepción de la señal. Cuando se realiza la integración de pulsos antes de pasar la señal por el filtro adaptado, los pulsos se están integrando de forma coherente y, cuando se integran después de pasar la señal por el filtro adaptado, sólo hay envolvente, se pierde la fase, de forma incoherente.

La existencia del filtro adaptado nos da igualmente pie a la utilización de técnicas de compresión de pulsos que permitan aumentar la resolución del sistema manteniendo la potencia media transmitida, siendo capaces de distinguir dos blancos muy cercanos entre sí, o incluso, sus dispersores (perfil de alta resolución).

### 3.4.1 Integración de pulsos

La técnica de integración de pulsos se conoce como la suma de los ecos radar de múltiples pulsos transmitidos. Los ecos reflejados de los blancos se suman, acumulando la potencia y ayudando a que ésta supere a la  $S_{min}$ .

Esto permite que aumente la relación Señal a Ruido (SNR) de la señal recibida, lo que incrementa de forma inherente la probabilidad de detección. El alcance radar también se verá afectado gracias a la integración de los pulsos, que aumenta de forma proporcional a la cantidad de éstos,  $\sqrt[4]{N_p}$  ;

Los sistemas radar pueden tener una integración de pulsos coherente, no coherente, o una combinación de ambas. El sistema no coherente detecta sólo la envolvente (amplitud) de la señal recibida mientras que el sistema coherente detecta la amplitud y la fase, considerando la señal recibida como un vector. La mayoría de los sistemas radar actuales utilizan integración coherente, dada su mayor eficiencia, aunque sigue habiendo todavía usos para los módulos de integración no coherentes.

#### 3.4.1.1 Integración coherente

Si la integración de los pulsos se lleva a cabo antes del filtro adaptado (y, por lo tanto, antes de la detección de envolvente), se denomina integración coherente. Ésta se caracteriza por realizar la suma de los pulsos recibidos en módulo y en fase, incrementando la amplitud de la señal. Si se utiliza un integrador coherente perfecto ( $E_i=100\%$ ), se mejorará la relación Señal a Ruido (SNR) de forma proporcional al  $N_p$ . En la práctica, siempre van a existir pérdidas en la integración, lo que le corresponderá una eficiencia determinada.

Para obtener una probabilidad de detección y una probabilidad de falsa alarma concretas se debe cumplir una SNR mínima determinada. Si no existiese integración, se requeriría ésta, pero al existir, la SNR mínima, para cumplir la probabilidad de detección que se precisa, es inversamente proporcional al número de pulsos que se integran, como se expresa en Ec. ( 3-34).

$$(SNR)_{N_p} = \frac{(SNR)_{1p}}{N_p} \quad (3-34)$$

Por lo tanto, la ecuación del alcance radar se ve modificada,

$$R_{m\acute{a}x_{AR}} = \sqrt[4]{\frac{P_{TX} \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma \cdot E_i \cdot N_p}{(4\pi)^3 \cdot L_T \cdot S_{min}}} \quad (3-35)$$

Donde se han añadido,

$N_p$  es el número de pulsos integrados.

$E_i$  es la eficiencia de la integración.

#### 3.4.1.2 Integración no coherente

En cambio, si la integración se lleva a cabo después del filtro adaptado (y, por lo tanto, tras la detección de envolvente) se denomina integración no coherente. Esta integración de pulsos es válida para la detección de cualquier tipo de blanco, sea fluctuante o no, ya que, a diferencia de los módulos coherentes, no precisa de estabilidad en frecuencia ni en fase.

Cuando  $N_p$  pulsos son integrados de forma no coherente, la relación señal a ruido resultante (SNR), se determina mediante la Ec. ( 3-36).

$$\left(\frac{S}{N}\right) = \frac{N_p \cdot \left(\frac{S}{N}\right)}{1 + \left(\frac{S}{N}\right)} \quad (3-36)$$

### 3.4.2 Compresión de pulsos

Hasta el momento, el único método para mejorar la resolución en distancia pasa por reducir el ancho de pulso transmitido, lo que permitiría obtener perfiles de los blancos con mucha resolución, siendo capaces de distinguir cada uno de sus dispersores más notables. Este hecho cuenta con una repercusión, ya que reducir el ancho de pulso implica la reducción de la potencia media del sistema y la probabilidad de detección. Adicionalmente, también se ve afectado el ancho de banda, ya que éste es inversamente proporcional al ancho del pulso. Si aumenta el ancho de banda, se puede introducir mayor cantidad de ruido y provocar interferencias en la detección de los blancos, algo que sin duda hay que evitar en este tipo de sistemas.

Llegada a esta contraposición, surgen las técnicas de compresión de pulsos, que pretenden mejorar la resolución en distancia para poder diferenciar blancos muy próximos e incluso, sus propios dispersores, a partir de un ancho de pulso suficientemente ancho que no degrade la probabilidad de detección.

#### 3.4.2.1 Compresión de pulsos en frecuencia (CHIRPING)

La compresión de pulsos en frecuencia se basa en la transmisión de una señal *Chirp* durante el tiempo del ancho de pulso transmitido. La peculiaridad de esta señal subyace en la modulación en frecuencia, aumentando linealmente con el tiempo.

Gracias a esta compresión se consiguen ganancias de compresión (*GC*) muy altas (del orden de  $10^4$  o superior) a partir de un circuito de fácil implementación. Esta ganancia depende del ancho de banda de la señal *Chirp* y del ancho de pulso transmitido, como se indica en la Ec. (3-37).

$$GC = \tau \cdot B \quad (3-37)$$

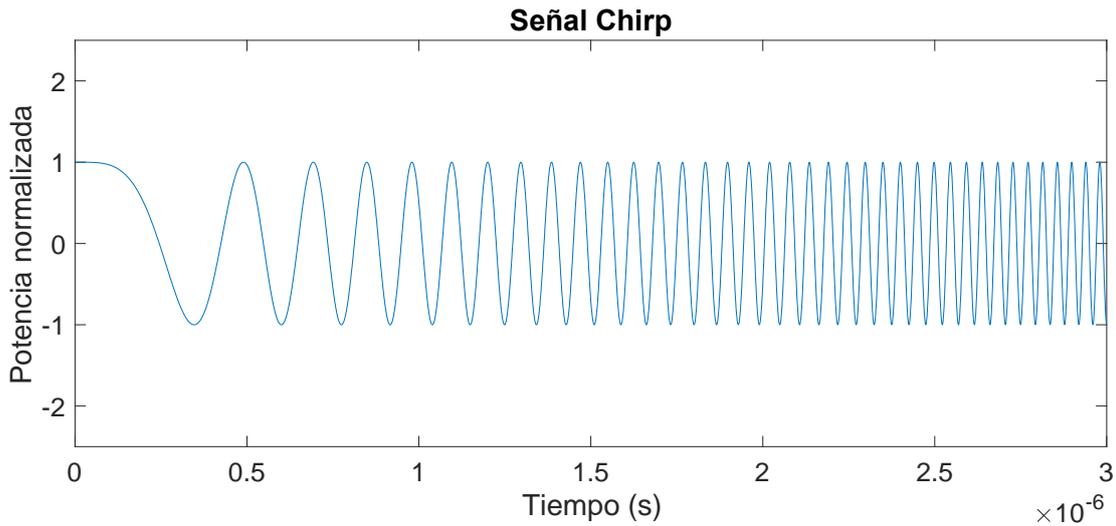
Donde:

$\tau$  es el ancho de pulso transmitido,

$B$  es el ancho de banda de la señal *Chirp*.

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo de la compresión es la mejora de la resolución en distancia. Este tipo de señal proporciona buena resolución tanto en distancia como en velocidad radial. La resolución depende de la pendiente de la señal *Chirp*, y si no se modifica su periodo, depende exclusivamente del ancho de banda, como se indica en la Ec. (3-38).

$$\Delta R = \frac{c}{2 \cdot B} \quad (3-38)$$

Figura 3-6 Señal *Chirp*

En la Figura 3-6 se observa la forma de onda de un pulso transmitido con modulación tipo *Chirp*, como los utilizados al aplicar compresión en frecuencia.

#### 3.4.2.2 Compresión de pulsos en fase

El objetivo de la compresión de pulsos en fase es el mismo que en frecuencia: aumentar la resolución en distancia. Esta compresión se basa en el uso de un código binario tipo pseudoaleatorio, Barker, u otro, para modular la fase de la señal transmitida. Esta forma de onda consta de varios subpulsos o chips durante la transmisión del pulso. Cada subpulso tiene una fase relativa a los demás, que pueden ser 0 o 180 grados, es decir, la señal senoidal tal como es, o invertida. Cada subpulso tiene una duración  $\tau_p$  que es la relación entre la duración total del pulso grande y el número de chips, como se expresa en la Ec. (3-39).

$$\tau_G = \tau_p \cdot n_{chips} \quad (3-39)$$

Donde:

$\tau_G$  es el ancho de pulso grande,

$\tau_p$  es el ancho de pulso pequeño,

$n_{chips}$  es el número de chips.

Al igual que con la compresión de pulsos en frecuencia se consigue una mejora considerable en la resolución en distancia. Ésta depende del ancho de pulso de cada chip, como se refleja en la Ec. (3-40).

$$\Delta R = \frac{c \cdot \tau_p}{2} \quad (3-40)$$

En cambio, su ganancia de compresión es del orden de 100 a 1000, y se obtiene, como se indica en la Ec. (3-41).

$$GC = \frac{\tau_G}{\tau_p} \quad (3-41)$$

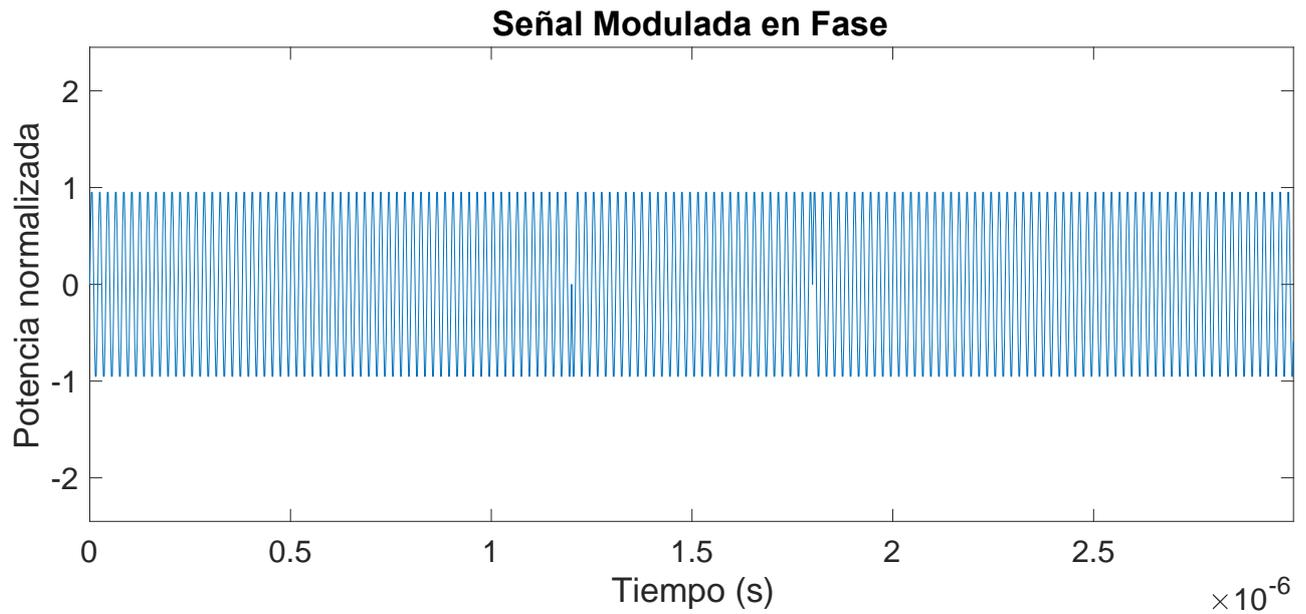


Figura 3-7 Señal modulada en fase

Como se muestra en la Figura 3-7, la onda invierte su fase cuando es un 0 lógico en el código binario, y se observa esos saltos de fase entre algunos periodos del chip.

El uso de la compresión en frecuencia está mucho más extendido que el de la compresión en fase, ya que es más sencillo y barato, lograrlo. En cambio, sistemas que necesiten cierta protección contra *jamming* u otras operaciones de decepción, utilizan compresión en fase, aunque sean de menor ganancia de compresión, por el hecho de usar códigos pseudoaleatorios que los hacen más seguros.

Sistemas militares actuales, como el SPY, que usa la Armada Española, utiliza una combinación de los dos tipos de compresión de pulsos, introduciendo una señal *Chirp* dentro de cada chip, de duración el ancho de pulso pequeño.

## 4 DESARROLLO DEL TFG

### 4.1 Introducción

En este trabajo se va a desarrollar un simulador de un radar pulsado en el entorno gráfico de Matlab. En él, el alumno podrá interactuar con los principales parámetros del radar y de los blancos. Mediante la modificación y previa configuración de estos, el programa podrá realizar la detección de los diferentes contactos. Esta aplicación trae consigo una serie de mejoras con respecto al simulador original, como son la implementación de un sofisticado integrador de pulsos que permita apreciar si la potencia recibida del blanco supera la sensibilidad del radar, y un módulo de compresión de pulsos, para mejorar la resolución en distancia, y poder así, diferenciar dos blancos muy próximos entre sí (o los diferentes dispersores de un blanco).

En este capítulo se detallan los pasos que se han seguido para conseguir este simulador en orden secuencial.

### 4.2 Generación de la señal Transmitida

Tras haber introducido manualmente los diferentes parámetros del radar, el simulador procede a generar la señal transmitida. Para que se asemeje más a la realidad, se ha generado una señal senoidal simulando un oscilador local controlado por tensión (VCO) durante el ancho de pulso. A esta señal senoidal se la denomina *señal patrón* y puede tomar tres formas de onda diferentes en función de si el sistema radar cuenta con compresión de pulsos en frecuencia, en fase o no dispone de él.

#### 4.2.1 Generación de la señal patrón básica

La onda transmitida es una señal senoidal cuya frecuencia es la frecuencia de trabajo del radar y su duración es el ancho del pulso transmitido. En la Figura 4-1 se observa la forma constante de este tipo de onda. Estas señales son fáciles de generar y abaratan el coste del sistema radar, pero no suelen utilizar.

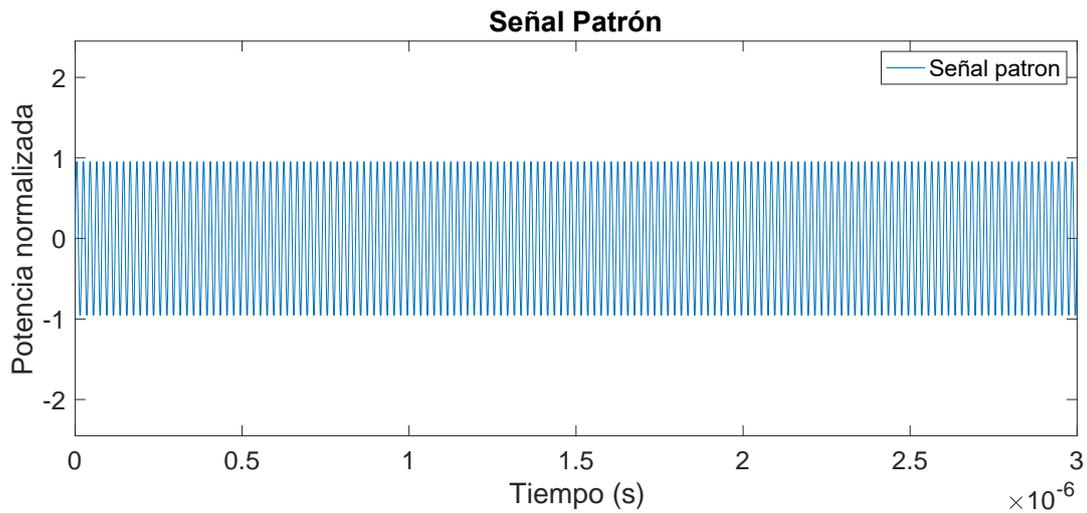


Figura 4-1 Señal patrón senoide constante

#### 4.2.2 Señal modulada en frecuencia o chirp

Para generar la señal patrón modulada en frecuencia basta con usar una señal predefinida *chirp*. Las señales moduladas en frecuencia tienen una amplitud constante pero su frecuencia aumenta linealmente en función del tiempo, como se observa en la Figura 4-2. Se ha implementado la señal *chirp* dentro del tiempo de transmisión,  $\tau$ .

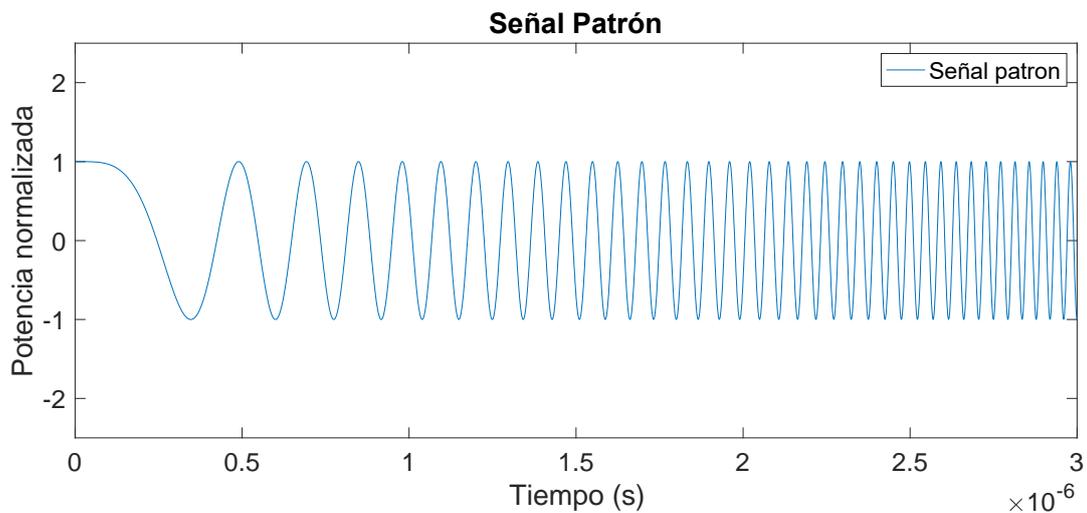


Figura 4-2 Señal Patrón modulada en frecuencia

#### 4.2.3 Señal modulada en fase

Para generar la señal modulada en fase se ha inicializado una función que genera un código binario pseudoaleatorio de longitud variable por el usuario que modula la fase de la señal. Ésta se ha corregido para que genere un número de periodos completos y no haya problemas de desfase entre el 0 y el 1, lógicos. En la Figura 4-3 se aprecia los cambios de fase entre un 1 y un 0, que éste último sería la señal con la fase invertida.

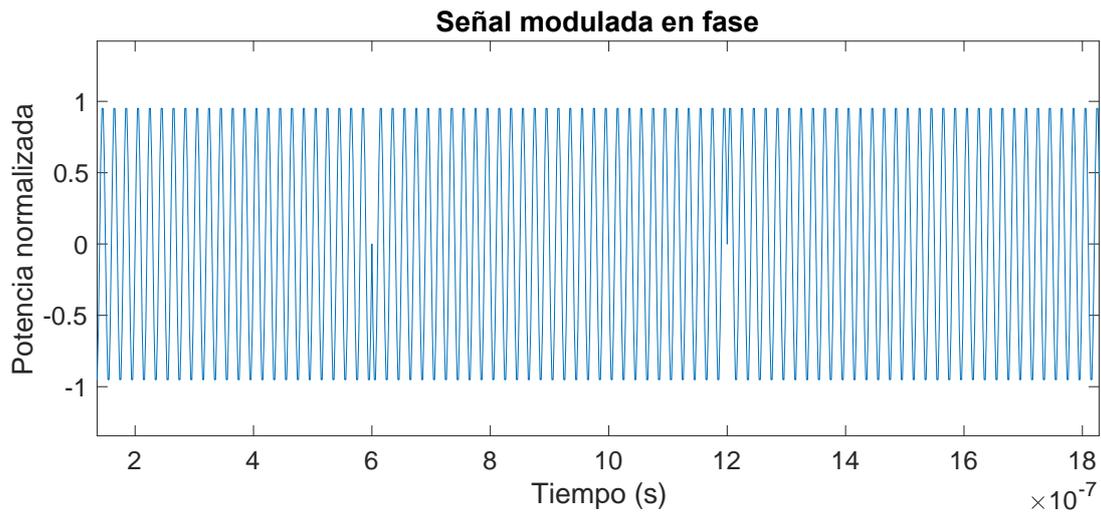


Figura 4-3 Señal Patrón modulada en fase

Tras la definición de los tres tipos de señal patrón, dependiendo de las características del radar y de su módulo de compresión de pulsos, se escogerá una u otra, teniendo en cuenta sus ventajas e inconvenientes. Esta señal además será la que se compare con la señal recibida en el filtro adaptado, obteniendo su correlación.

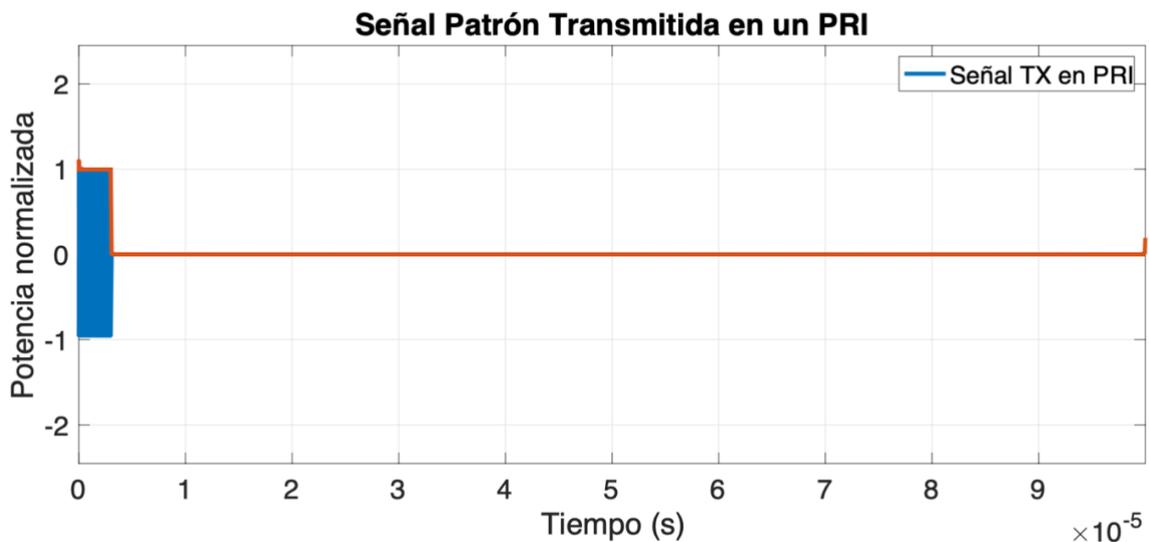


Figura 4-4 Señal Patrón en PRI

Como se observa en la Figura 4-4, la señal se transmite durante la duración del pulso en un PRI, ya que se trata de un radar pulsado.

### 4.3 Generación señal Recibida

La señal recibida de un blanco se genera en función de la señal patrón transmitida, la potencia recibida (que dependerá de la RCS del blanco) y la posición estimada del mismo que hace que la señal esté desplazada esa distancia en tiempo, es decir, no empieza a recibirse hasta que no se ha detectado el blanco a su distancia correspondiente. La señal recibida por el sistema será el sumatorio de las señales recibidas de todos los blancos detectados.

#### 4.3.1 Estimación potencia recibida y posición del blanco

A partir de los datos del blanco de la RCS y de la distancia se puede calcular una estimación de la potencia recibida que llega al receptor.

$$P_{Rx} = \frac{P_{Tx} \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma \cdot N_p \cdot E_i \cdot GC}{(4\pi)^3 \cdot L_T \cdot R^4} \quad (4-1)$$

Como se ha comentado anteriormente, la señal recibida empezará en función de la distancia al blanco. En unidades de tiempo, la recepción del eco del blanco dará comienzo según la Ec. (4-2).

$$t_0 = \frac{2 \cdot R}{c} \quad (4-2)$$

#### 4.3.2 Generar señal recibida

La señal recibida en el receptor será el sumatorio de todas las señales recibidas de cada uno de los blancos detectados.

En la Figura 4-5 se puede representan las señales recibidas de cada uno de los blancos, en este ejemplo, tres señales recibidas de tres blancos de diferentes características. El radar es incapaz de hacer esta diferenciación, puesto que ambas señales se suman en el espacio libre, por lo que la Figura 4-6 representa la señal recibida total por el receptor, es decir, el sumatorio de las señales recibidas.

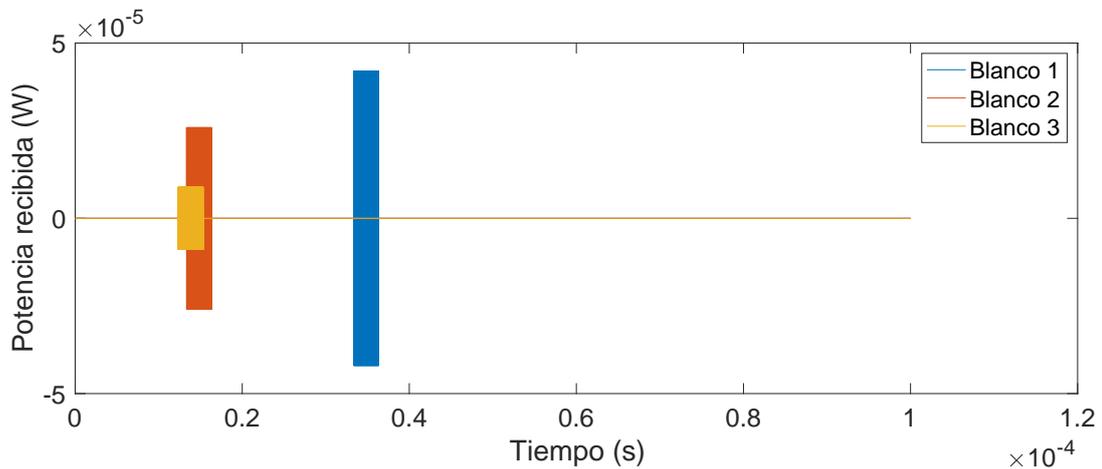


Figura 4-5 Señal recibida de cada blanco

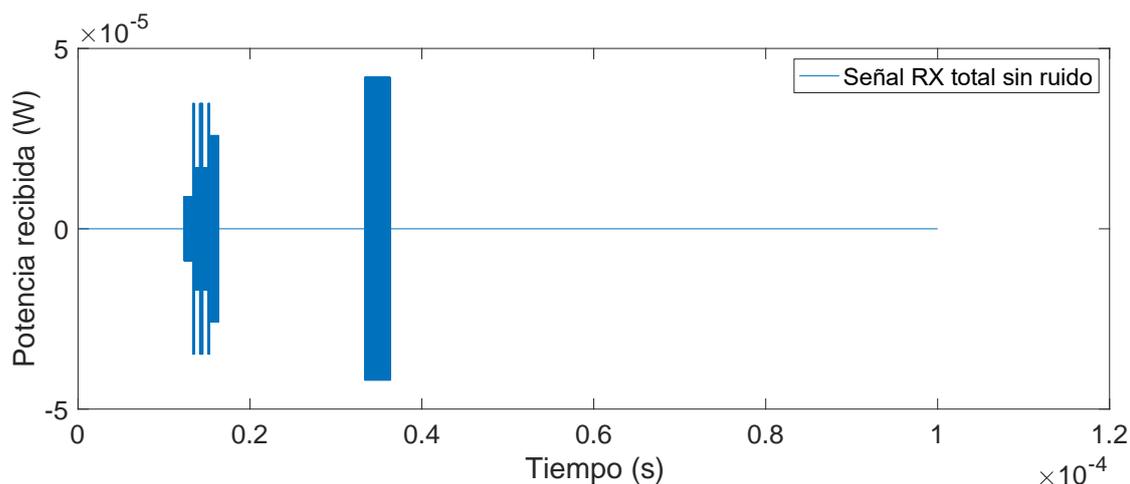


Figura 4-6 Señal recibida total

## 4.4 Módulo de integración de pulsos

Uno de los módulos que se pretende mejorar con este simulador es el de la integración de pulsos. Como se ha definido previamente, la integración de pulsos puede ser de dos tipos, dependiendo de si se suma la señal de forma coherente (amplitud y fase) o de forma incoherente (sin tener en cuenta la fase). En sistemas radar, esto equivale, generalmente, a tener el módulo de integración antes o después del detector de envolvente (o, en el caso de este TFG, tras el filtro adaptado), respectivamente. Para que el simulador pueda operar en tiempo real, ha sido necesario la optimización del código aplicando vectorización en la medida de lo posible. Sin aplicar vectorización, y dada la elevada tasa de muestreo, los tiempos de ejecución se harían demasiado elevados.

### 4.4.1 Integración coherente

En la integración coherente, se integra la señal tal y como se recibe, en módulo y en fase, como se observa en la Figura 4-7. La señal recibida se le ha sumado ruido inherente a la propagación (y al propio sistema), que es proporcional a la densidad espectral de la potencia de ruido térmico, véase 3.3.1. En la integración coherente, la SNR mínima necesaria para hacer una detección se ve reducida en función del número de pulsos integrados, ya que el ruido es incorrelado, y en cada señal recibida, éste tiene diferente módulo y fase.

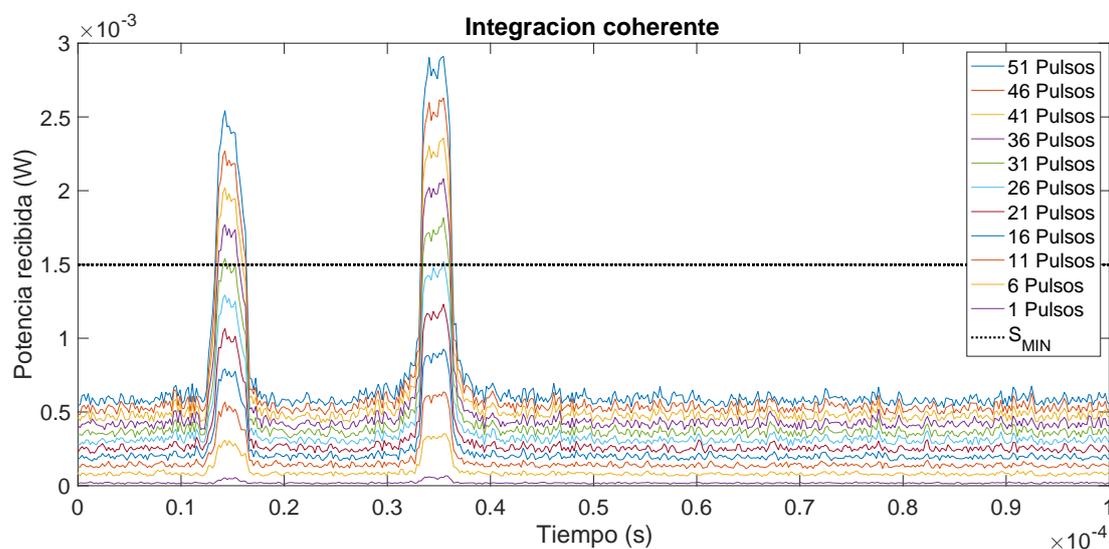


Figura 4-7 Integración coherente

Dependiendo de las características del módulo de integración que disponga el radar, tendrá una eficiencia de integración  $\sim 80\% - 100\%$ . Aunque en la Figura 4-7 se han dispuesto los pulsos de 5 en 5, para facilitar su visualización, en realidad en la integración coherente se suman todas las señales de los pulsos recibidos antes del filtro adaptado.

#### 4.4.2 Integración incoherente

En la integración incoherente en cambio, se integra la señal que sale del filtro adaptado. Por lo tanto, se considera únicamente la envolvente de la señal recibida y del ruido, porque el filtro adaptado pierde la información de fase. Estos pulsos se van sumando aplicando una eficiencia de integración en entre el  $\sim(50\% - 70\%)$ , típica de estos módulos, como se observa en la Figura 4-8.

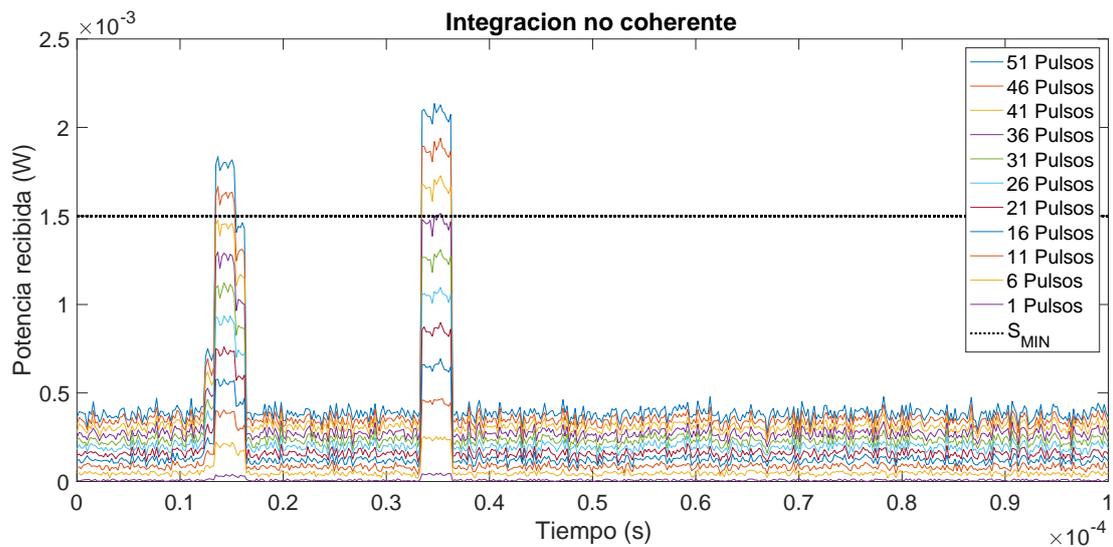


Figura 4-8 Integración no coherente o incoherente

#### 4.4.3 Comparación entre la integración coherente e incoherente

Además, se han sacado unas gráficas para facilitar la comparación entre los dos diferentes tipos de integración, y lo que cambiaría si se realizase la integración antes o después del filtro adaptado. En la Figura 4-9 se comparan en la misma gráfica para poder observar la amplitud de la potencia recibida con respecto a la potencia mínima detectable por el sistema radar. Como se puede apreciar, la señal integrada de forma coherente tiene mayor amplitud que la incoherente.

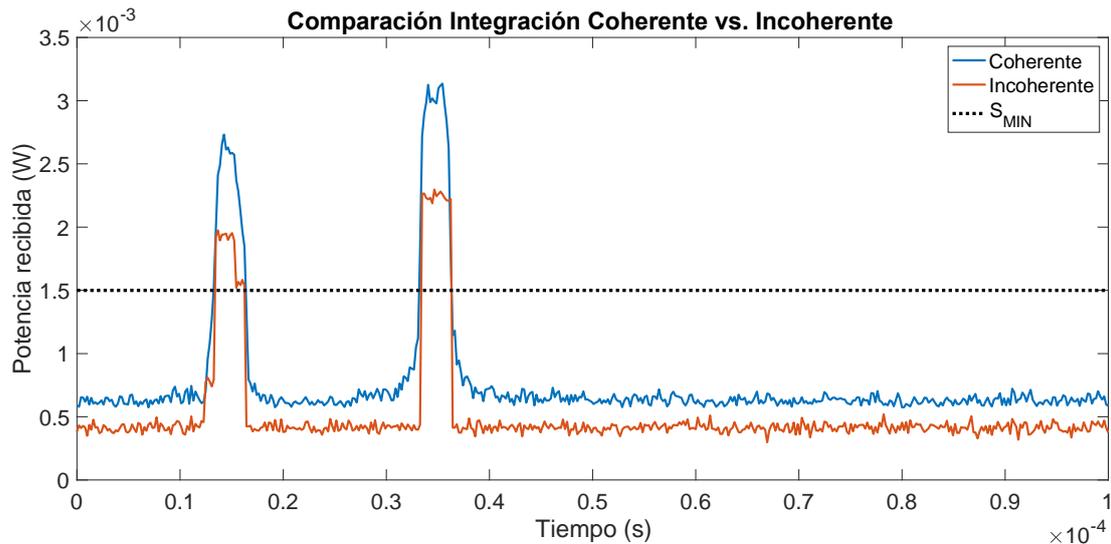


Figura 4-9 Comparación Integración

En la Figura 4-10 se representa cada tipo de integración en una gráfica por separado para apreciar con mayor claridad la diferencia entre ambos sistemas.

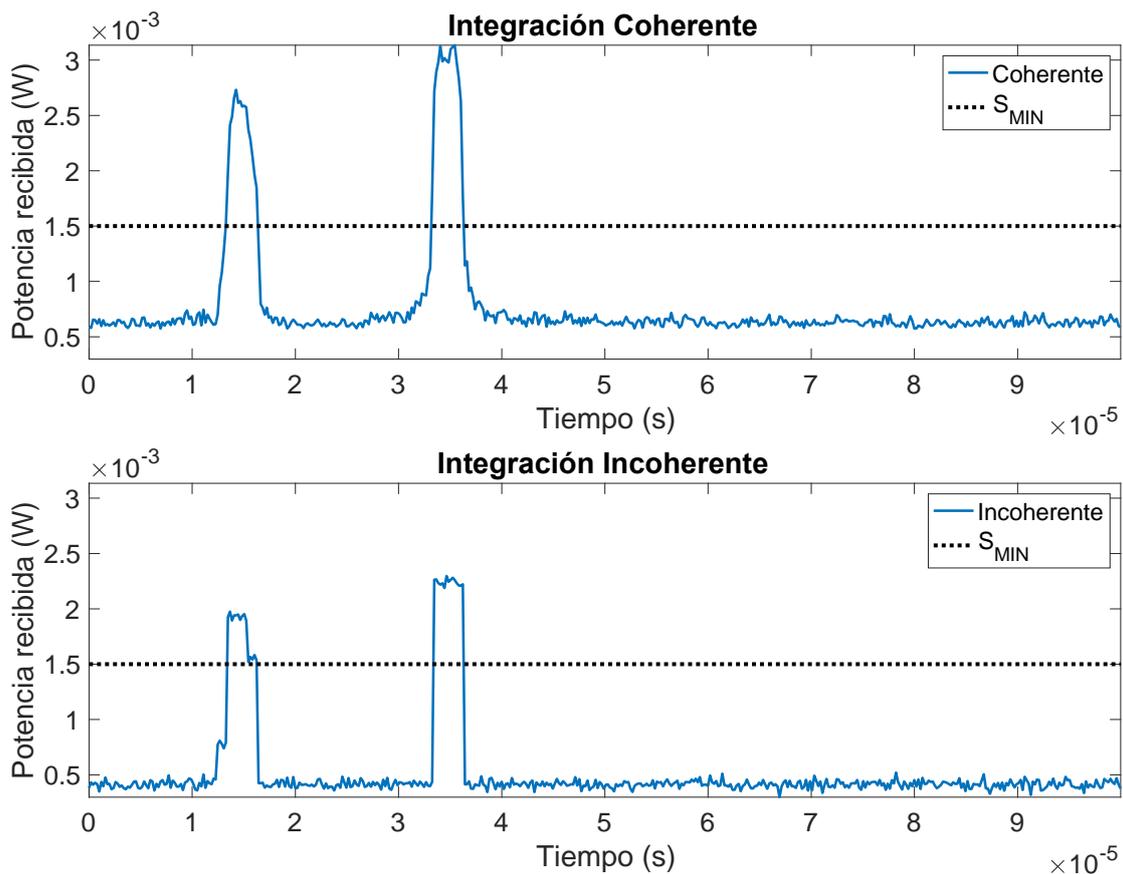


Figura 4-10 Comparación de los dos tipos de integración en dos gráficas

Para concluir, la señal integrada de forma coherente tiene mayor amplitud y, por lo tanto, mayor probabilidad de detección que la integrada de forma incoherente. Sin embargo, es necesario implementar los dos tipos debido a que la integración incoherente sirve para mejorar la detección de blancos fluctuantes. Al no integrar los pulsos de manera constante, y como la fase en los blancos Swerling varía, el efecto de estos es menor con esta tecnología.

## 4.5 Compresión de pulsos y filtro adaptado

En el filtro adaptado se realiza la correlación entre la señal patrón, aquella que se nombraba en el apartado 4.2 y la señal recibida en el receptor. Para realizarlo se puede implementar de dos formas diferentes, con el operador convolución o con el operador correlación. Ambas operaciones realizan la función del filtro adaptado que es la autocorrelación, es decir, calcular el parecido de dos señales en función de cada instante de tiempo.

Ambas tienen sus ventajas e inconvenientes para cada tipo de señal patrón, ya sea señal modulada en frecuencia o en fase, pero al final se ha decidido por la convolución ya que la correlación descentra el eje de tiempos y, por lo tanto, la estimación de la distancia al blanco se vuelve más errónea.

### 4.5.1 Correlación señal senoidal

Inicialmente, sin compresión de pulsos, no se pueden distinguir los blancos próximos, como se puede ver en la Figura 4-11.

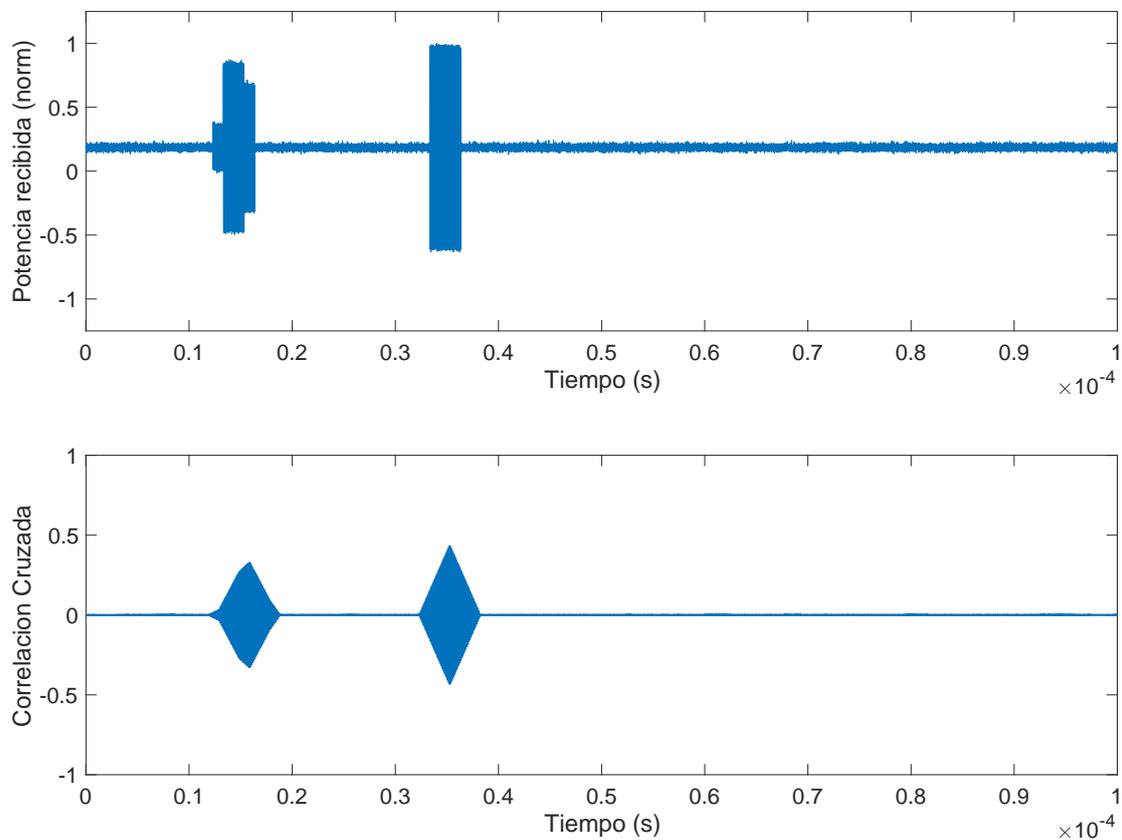


Figura 4-11 Correlación señal senoidal

#### 4.5.2 Correlación señal modulada en frecuencia y en fase

La señal que se aprecia en la Figura 4-12, corresponde con la señal *Chirp*. Ésta se ha generado a partir de los parámetros de ancho de pulso grande y del ancho de banda.

Entonces, como se comentó en el apartado 3.4.2.1, el objetivo del uso de esta forma de onda, es mejorar la resolución en distancia. Ésta se define como se indica en la Ec.( 4-3).

$$\Delta R = \frac{c}{2 \cdot B} \quad (4-3)$$

Con esta señal modulada en frecuencia se consigue mayor resolución, siendo capaces de poder diferenciar en distancia los dos blancos juntos que se encuentran en la Figura 4-5.

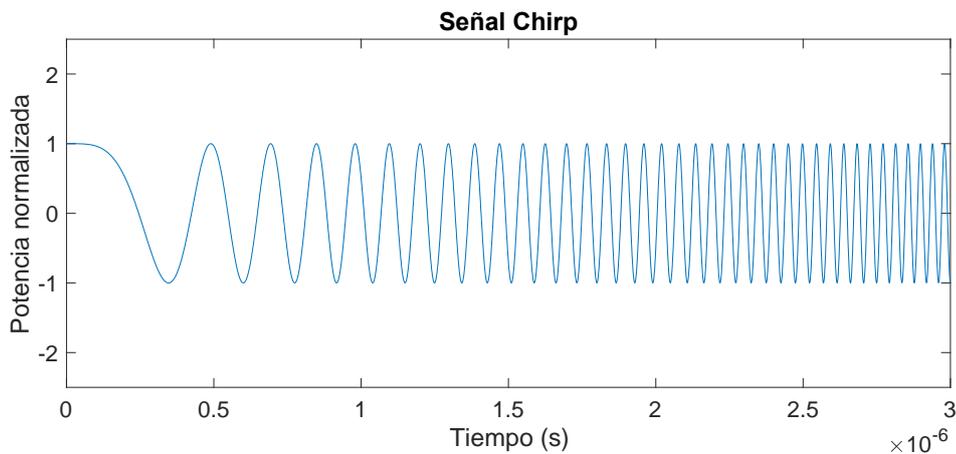


Figura 4-12 Señal *chirp* generada

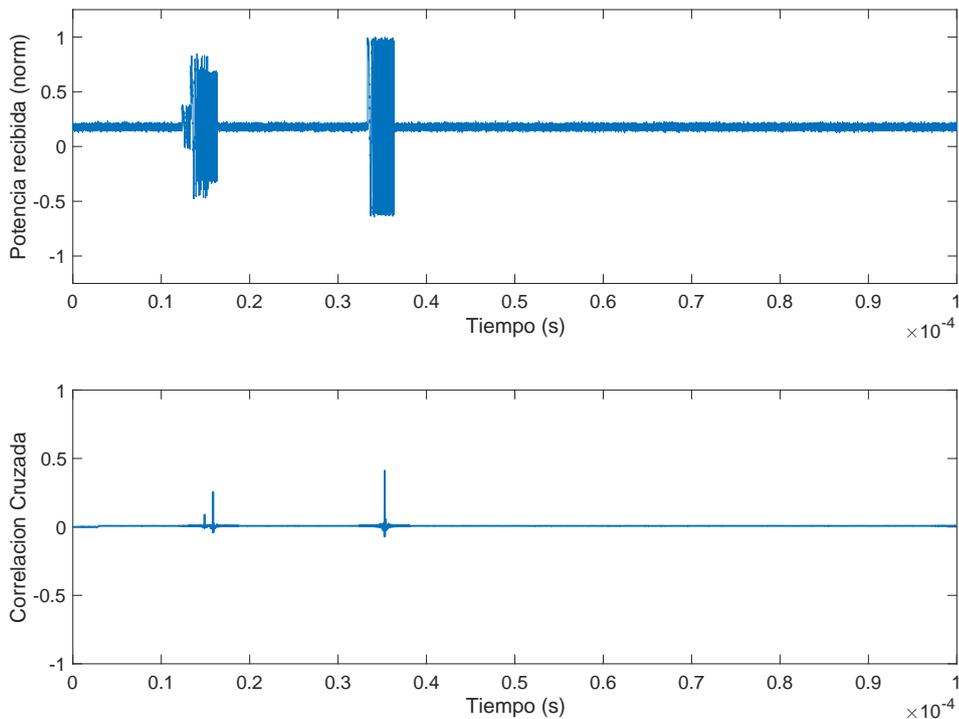
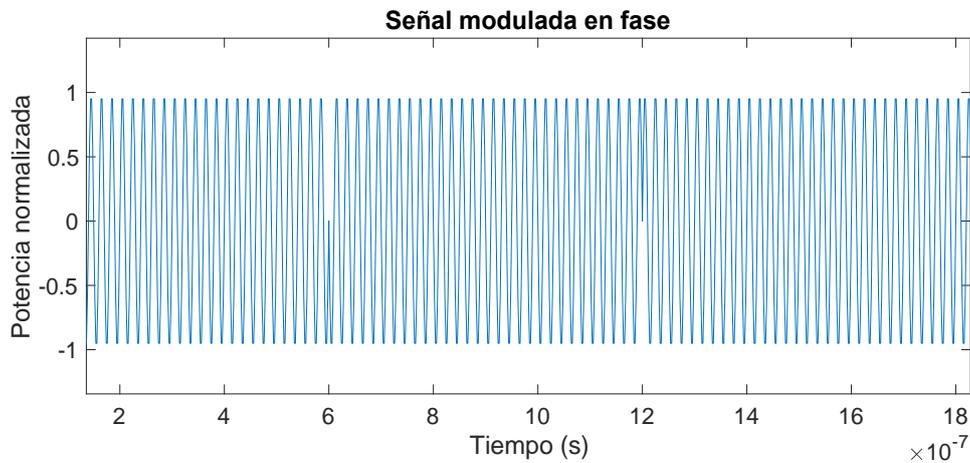
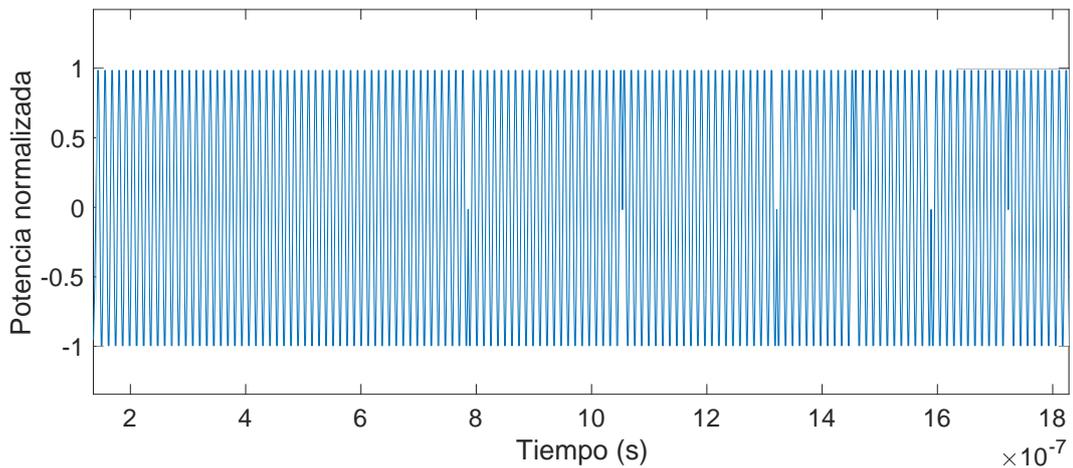


Figura 4-13 Correlación cruzada entre la señal modulada en frecuencia y la señal recibida

En la Figura 4-13 se observa como la correlación cruzada de la señal modulada en frecuencia permite diferenciar con gran resolución los dos blancos próximos.



**Figura 4-14 Señal modulada con código pseudoaleatorio**



**Figura 4-15 Señal modulada con código Barker**

Como se ha mencionado anteriormente en el apartado 3.4.2.2, la señal modulada en fase se define en función del código binario. En la Figura 4-14 se aprecia una señal modulada con un código pseudoaleatorio de cuatro chips y en la Figura 4-15, un código Barker de trece chips. [11] En el primer caso, la señal se puede generar con el número de chips que se requieran que, en función del ancho de pulso grande, fija el valor del ancho de pulso de cada chip. Éste se relaciona mediante la Ec. ( 4-4) con el valor de la resolución en distancia.

$$\Delta R = \frac{c \cdot \tau_p}{2} \tag{4-4}$$

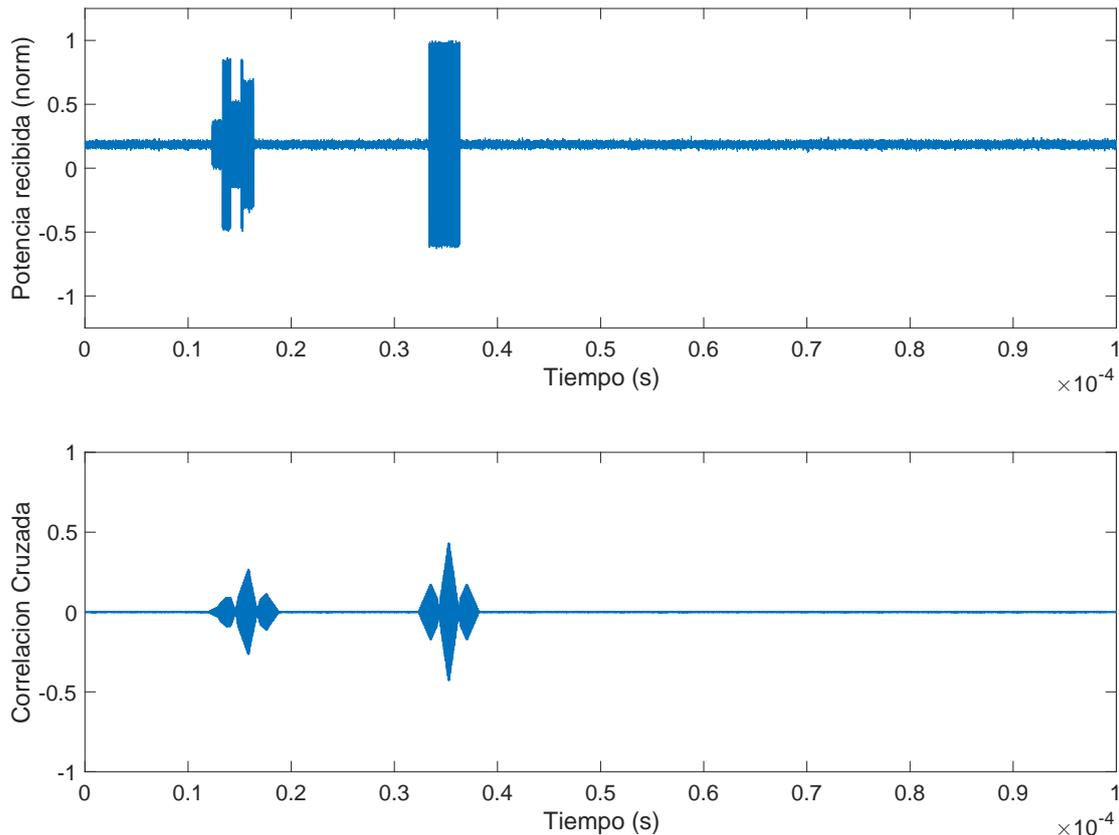
En conclusión, el valor de la resolución mejorará en función del número de chips generados, es decir, de la longitud de la secuencia binaria.

Como se observa en la Figura 4-16, la señal modulada en fase necesita un inventariado para poder distinguirse.

Una vez que salen del filtro adaptado, se coge la envolvente de la señal. En el caso del *chirping* o modulación en frecuencia, ésta se lleva directamente al detector, que se analizará de forma detallada en el apartado 4.6.

En el caso de la señal modulada en fase después de la envolvente, se realiza un enventanado de la señal para así limpiarla, que se detallará en el apartado 4.5.3.

En la Figura 4-17 se compara los diferentes tipos de compresión de pulsos y lo que esto produce en la detección de blancos. Además, se puede apreciar cómo en función del tipo de compresión de pulsos, la señal que sale del filtro adaptado es diferente.

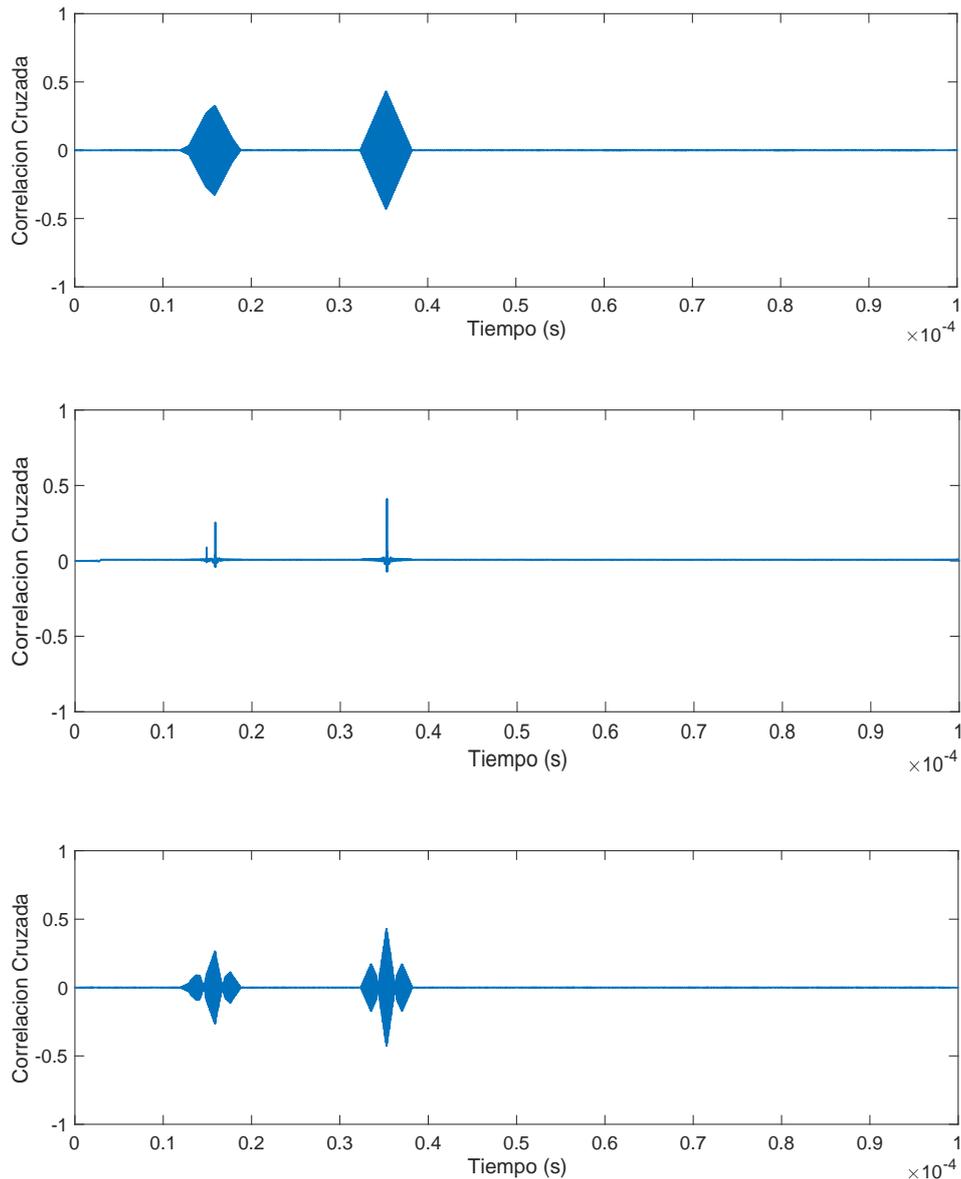


**Figura 4-16 Autocorrelación señal modulada en fase y señal recibida**

En la parte superior de la Figura 4-17 se muestra la salida del filtro adaptado, cuando se ha transmitido una señal senoidal básica (sin modulación/compresión de ningún tipo). En este caso, el filtro adaptado ayuda a discernir entre señal y ruido, pero se puede comprobar que no mejora la resolución del sistema.

La imagen central muestra la salida del filtro adaptado cuando se ha transmitido una señal modulada en frecuencia (*chirp*). A diferencia del caso anterior, el filtro adaptado juega un papel decisivo en la detección de blancos, pues se aprecia la enorme mejoría en la resolución del sistema, que ahora es capaz de detectar cada uno de los tres blancos sin ningún tipo de ambigüedad.

Por último, en la gráfica inferior se muestra la salida del filtro adaptado cuando se ha transmitido una señal modulada en fase. Se percibe un aumento de la resolución con respecto a la señal senoidal básica, pero también un aumento del nivel de lóbulos laterales que puede dar lugar al aumento de falsas alarmas. Para minimizar este efecto, en este caso se debe añadir un enventanado en tiempo de la señal recibida que ayude a reducir este efecto y filtre la señal de entrada al detector.



**Figura 4-17 Comparación compresión de pulsos**

### 4.5.3 Enventanado señal modulada en fase

Al salir la señal modulada en fase del filtro adaptado, se calcula su envolvente y posteriormente se filtra en tiempo con un enventanado. Este enventanado es necesario previo a su paso por el detector ya que la modulación en fase eleva considerablemente los lóbulos laterales, lo que puede inducir a falsas alarmas en el detector. El enventanado reduce este efecto. Se debe llegar a un compromiso entre el ancho del lóbulo principal y la minimización de los lóbulos laterales. En el caso de la compresión en frecuencia el enventanado no es necesario ya que no se generan lóbulos laterales de amplitud considerable que puedan provocar anomalías y falsas alarmas en la detección.

En la Figura 4-18 se aprecia la importancia del enventanado puesto que la comparación entre las dos gráficas deja patente cómo se reducen los lóbulos laterales alrededor del lóbulo principal.

Existen múltiples tipos de ventanas diferentes, cada una con sus propias características y su nivel de rechazo de lóbulos secundarios. La Figura 4-19 muestra algunos de los diferentes tipos de ventanas que se pueden aplicar, como son las ventanas Hanning, Hamming, Bartlett, Kaiser, Gaussiana o Blackman, entre otras.

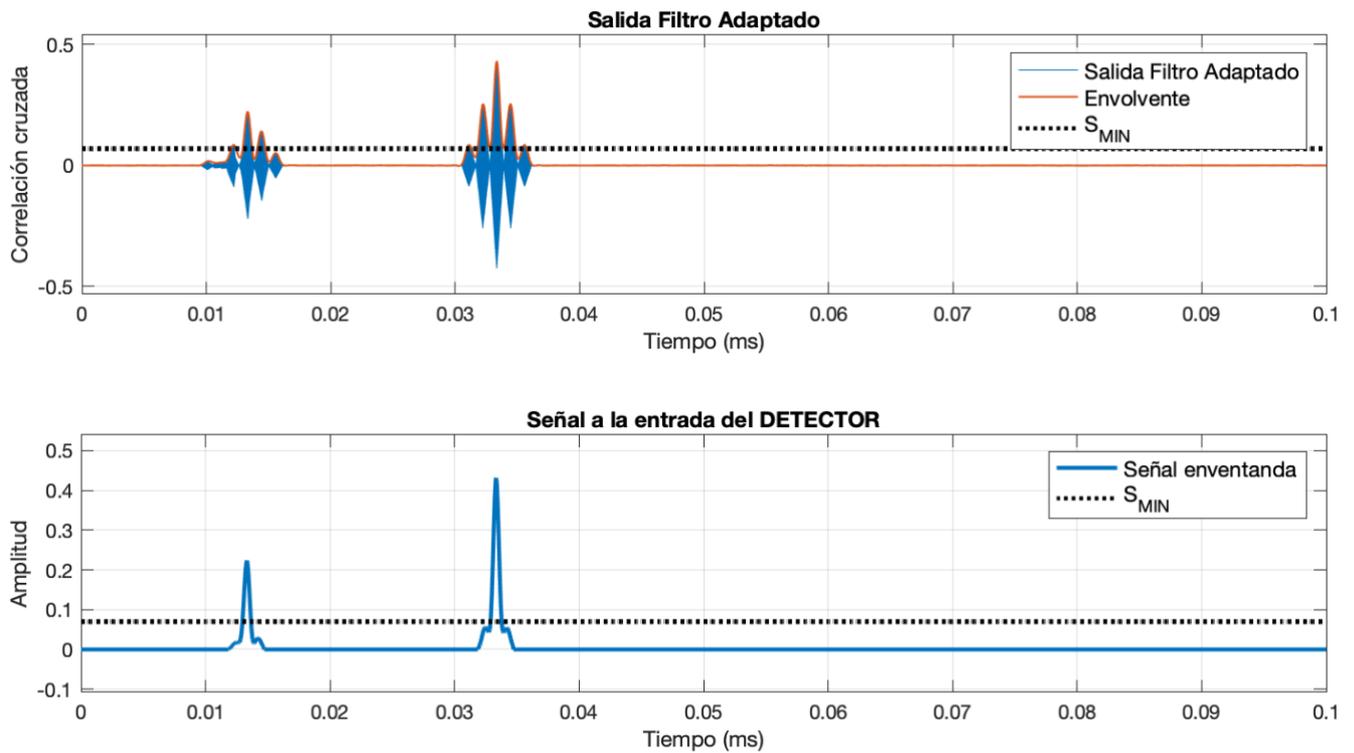


Figura 4-18 Señal modulada en fase eventanada

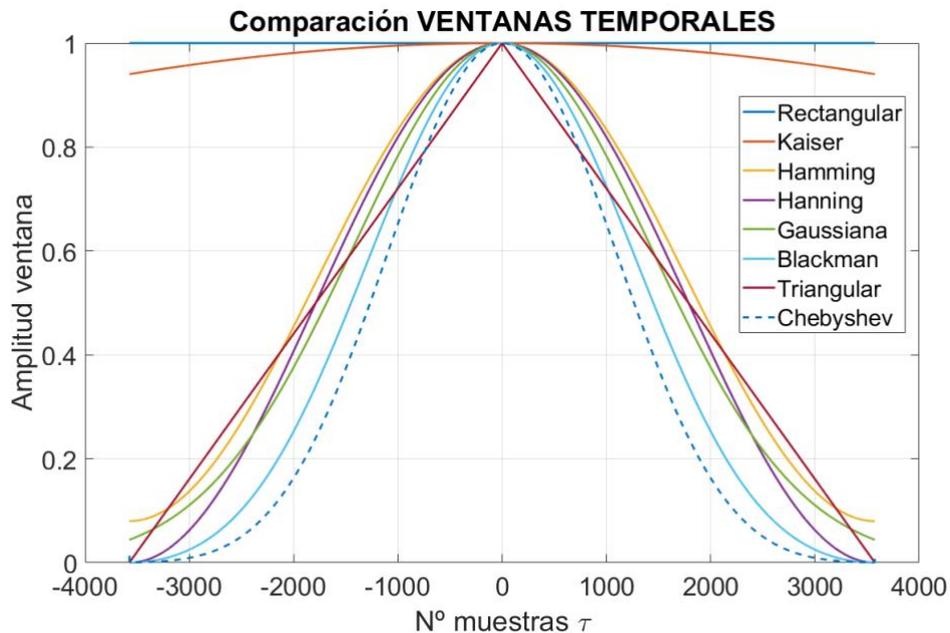


Figura 4-19 Comparación ventanas temporales

Para realizar el eventanado, hay que colocar la ventana de forma centrada en cada uno de los diferentes picos de la señal, y de esta forma, los lóbulos laterales se reducen drásticamente, quedando la señal más estrecha y, por lo tanto, dejando únicamente que el lóbulo principal supere el umbral de detección.

La señal resultante del eventanado es la que entrará al detector, cuyo proceso se describe en el apartado 4.6.

## 4.6 Recepción y detección de blancos

Una vez que la señal incide en el blanco y retorna al radar, seguirá el diagrama de bloques descrito en la Figura 4-20, dependiendo si la integración que caracteriza al sistema es definida por el usuario como coherente o incoherente. Primero, se recibe la señal de los blancos que se caracterizan por su distancia y por la RCS de cada uno.

En la integración coherente, se suman todos los pulsos y posteriormente, se correla con la señal patrón en el filtro adaptado, obteniéndose sus perfiles con más resolución. A continuación, se hace la envolvente de la señal que sale del filtro adaptado y se pasa por el detector, resultando los parámetros estimados que se presentan en la Figura 4-20.

En la integración no coherente únicamente se suman las potencias envolventes recibidas (sin tener en cuenta la información de la fase), por lo que en primer lugar se calculará la envolvente de la señal recibida de los blancos, para posteriormente sumar los pulsos integrados. Acto seguido, se pasa por el detector para obtener los mismos parámetros que en el caso anterior.

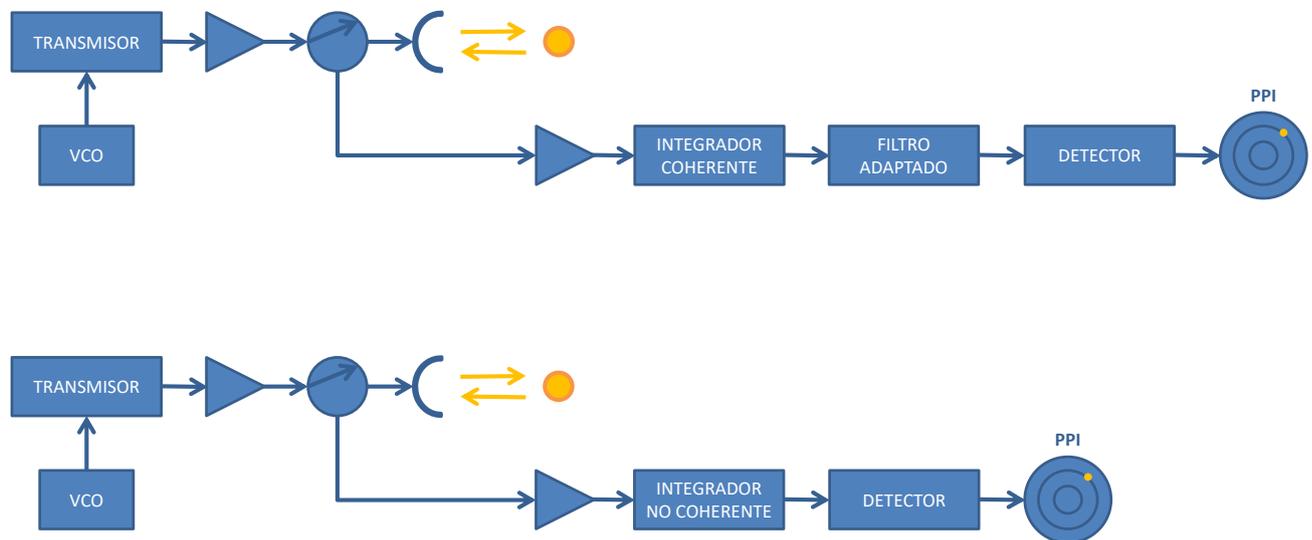


Figura 4-20 Diagrama de bloques

A la señal que sale del filtro adaptado se le calcula la envolvente y se dirige hacia el detector, donde se analiza la señal y se calculan el número de blancos detectados, sus distancias estimadas, la potencia recibida de cada uno de ellos y la RCS estimada a partir de la ecuación de alcance radar. (Ec. ( 4-5))

Para realizar el módulo de detección, en primer lugar, se han localizado los picos que superan el umbral. El número de picos que cumplen esta condición da referencia al número de blancos que se han detectado. Con el dato de la posición de ese pico a lo largo del PRI, se puede calcular la distancia estimada del blanco. Gracias al dato de posición del pico también se puede calcular la potencia recibida de los blancos. Siendo ésta, la media de la potencia alrededor de este pico, tomando como rangos el tamaño de muestras del ancho de pulso. Es por esto, que este cálculo es una estimación. A partir del cálculo de la potencia recibida se puede calcular la RCS estimada de cada uno de los blancos, mediante la Ec. ( 4-5).

$$\sigma_{estimada} = \frac{(4\pi)^3 \cdot L_T \cdot P_{RX} \cdot (R_{estimada})^4}{P_{TX} \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot E_i \cdot N_p} \quad (4-5)$$

## 5 MANUAL DE USUARIO

### 5.1 Introducción

En este capítulo se va a exponer y describir la interfaz gráfica de este simulador creada en el entorno de MATLAB. La mejora de la interfaz gráfica es uno de los principales objetivos de este TFG, y gracias a ella el usuario va ser capaz de interiorizar los conceptos de funcionamiento interno de un radar, ya que integra los diferentes módulos desarrollados. Por lo tanto, la creación de una interfaz sencilla e intuitiva es la clave para el desarrollo de este simulador. El entorno de trabajo ha evolucionado con respecto los últimos años, pasando a denominarse *App Designer*.

*App Designer* es un nuevo entorno de Matlab para crear y desarrollar aplicaciones gráficas y posteriormente compilarlas para su uso en cualquier ordenador sin necesidad de tener el programa base instalado. Ofrece muchas más posibilidades que *Guide*, su antecesor.

En este apartado se va a describir la interfaz de usuario en general, sus menús y diferentes ventanas y configuraciones. Posteriormente, se van a ir detallando en profundidad los módulos con los que cuenta este simulador al mismo tiempo que se valida la aplicación mediante el uso de ejemplos prácticos.

### 5.2 Menú principal

Al iniciar el simulador, la primera ventana que se visualiza en pantalla es el menú principal donde el usuario tiene la posibilidad de elección entre dos tipos de configuraciones radar. La Figura 5-1 ilustra este menú inicial.

La primera configuración consta de los siguientes módulos: el transmisor, el módulo de forma de onda, donde se genera el tipo de onda seleccionado, la integración de pulsos coherente, el filtro adaptado, y el módulo detector.

La segunda configuración es más sencilla y consta de los siguientes módulos: el transmisor y el de forma de onda, al igual que en la primera configuración, y posteriormente, la integración de pulsos incoherente y el módulo detector.

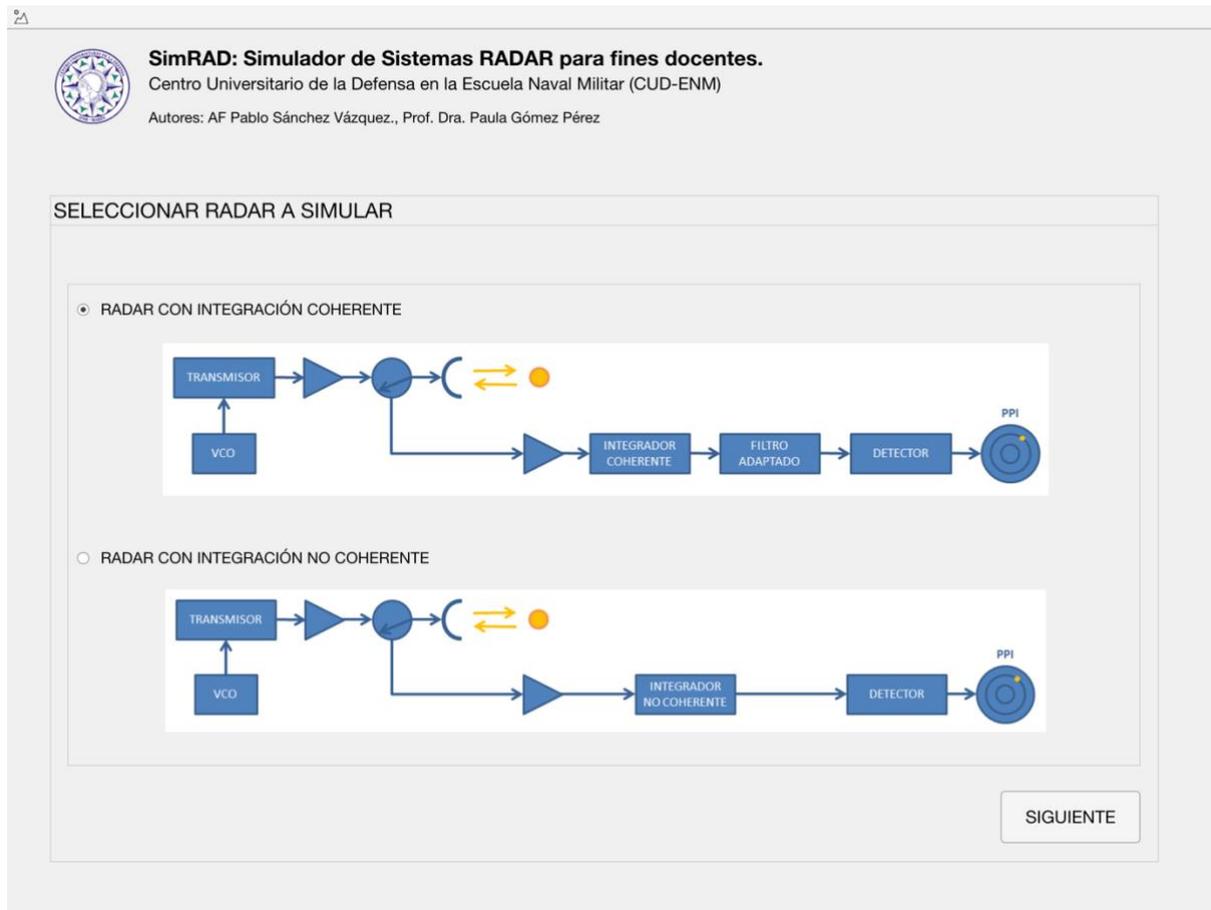


Figura 5-1 Menú Principal

### 5.3 Radar con integración coherente

Una vez seleccionada la primera opción y tras haber pulsado el botón de SIGUIENTE, se abrirá una nueva ventana donde se reflejan todos los componentes y módulos de los que dispone este radar. En la Figura 5-2 se observa la pantalla principal del radar seleccionado que incluye integración coherente y filtro adaptado.

Se puede comprobar que la ventana se divide en tres zonas: La parte superior muestra el diagrama de bloques del sistema que se va a simular, mientras que la parte central e inferior se corresponden con el panel de configuración y visualización, respectivamente.

El usuario podrá configurar el sistema mediante los botones disponibles en el panel de configuración, que se describirán a los siguientes subapartados. Una vez configurado, podrá visualizar los parámetros y señales en cada punto del diagrama de bloques mediante los botones del panel de visualización.

A continuación, se pasará a describir los menús que aparecen en cada uno de los botones que se corresponden a esta interfaz, comenzando por el panel de configuración y terminando por el de visualización.

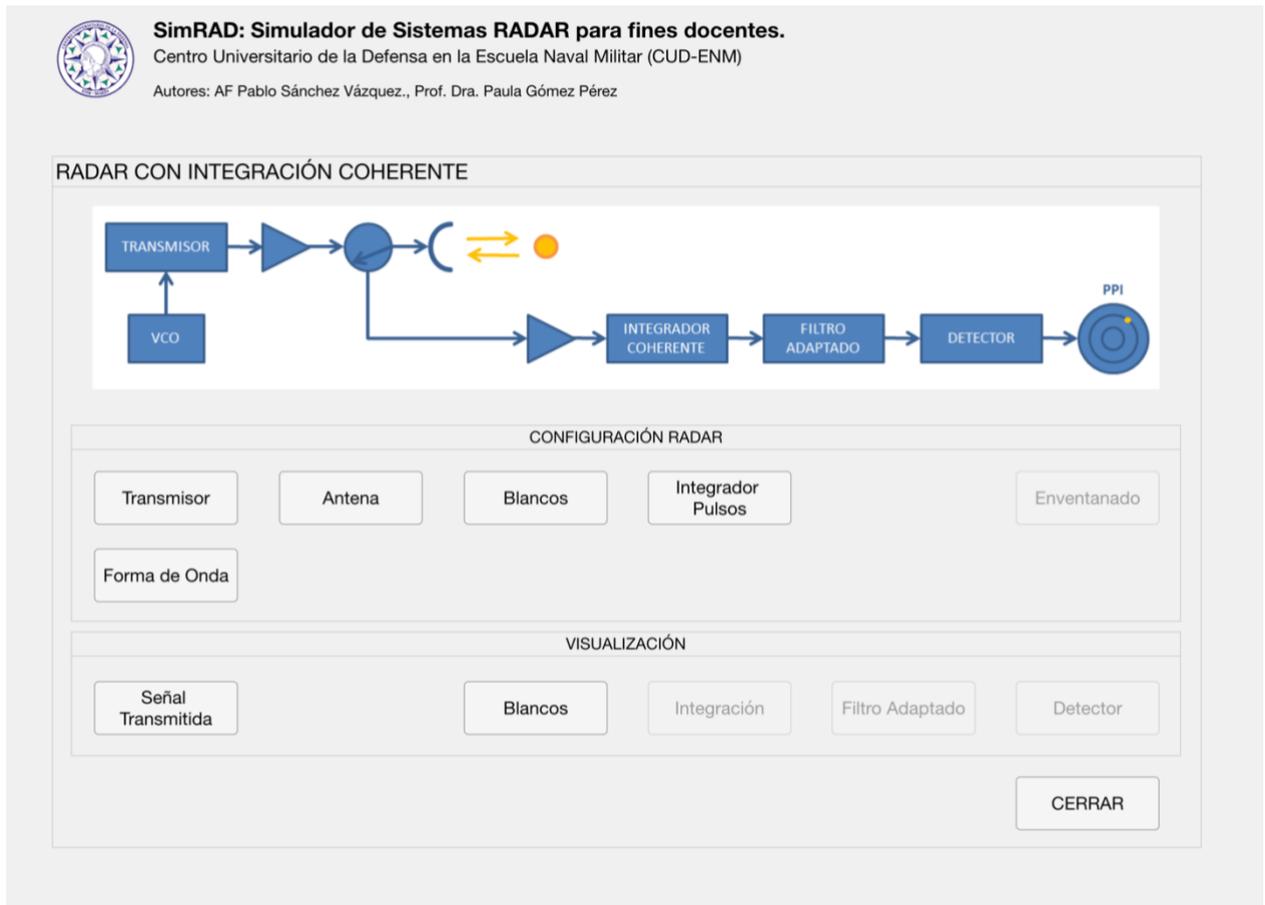


Figura 5-2 Radar con integración coherente

### 5.3.1 Transmisor

Este simulador viene configurado por defecto a una serie de parámetros de transmisión, que incluyen la potencia, la frecuencia, el ancho de pulso, la frecuencia de repetición de pulsos y las pérdidas en el transmisor. De esta forma, un usuario neófito en sistemas radar que no modifique nada podrá ejecutar una primera simulación completamente operativa.

Asimismo, proporciona un punto de partida (y de referencia) al usuario para ir modificando estos valores e ir comprobando el impacto que tienen cada uno de ellos en la detección.

Cuando el usuario pulse en el botón “Transmisor”, se abrirá la ventana mostrada en la Figura 5-3, que muestra los valores preestablecidos por defecto. Aquí se encuentran los *knobs* o mandos de configuración que modifican los valores de dichos parámetros dentro de unos límites establecidos. Para facilitar la configuración del sistema, en la parte inferior de cada mando se refleja en un cuadro el valor que está adquiriendo en todo momento el parámetro correspondiente.

El usuario podrá modificar cualquiera de ellos y tras pulsar el botón “GUARDAR” la aplicación salvará los cambios y regresará al menú de configuración.



Figura 5-3 Transmisor

### 5.3.2 Forma de onda

Una de las principales funcionalidades que posee este simulador es la implantación de un módulo de compresión de pulsos, tanto en fase como en frecuencia. Es por ello que es necesario configurar previamente la señal que se desea transmitir.

Por defecto, este simulador genera una señal senoidal constante que proporciona una detección muy sencilla y simple de los blancos, con escasa resolución.

Desde el menú de configuración del radar con integración coherente, el usuario debe pulsar el botón “Forma. de Onda”. Al pulsarse se le abrirá una nueva ventana donde tendrá que seleccionar que tipo de señal quiere generar.

En la Figura 5-4 se aprecian tres botones, que hacen referencia a los tres tipos de señal que permite seleccionar esta versión del simulador. Si se pulsa el primero, se abrirá la configuración de la señal senoidal. Si se pulsa el segundo botón, se abrirá la configuración de la señal modulada en fase. Si se pulsa el tercero, se abrirá la configuración de la señal modulada en frecuencia.



Figura 5-4 Forma de onda

### 5.3.2.1 Senoidal

Cuando le da al botón "Señal Senoidal Básica" se abre una nueva ventana encima de la anterior. Como se observa en la Figura 5-5, una vez abierta la ventana ya se ha generado la señal senoidal.

La señal senoidal se genera a partir de la frecuencia de trabajo del radar, el ancho de pulso, y la potencia de transmisión, parámetros que han sido configurados en el apartado 5.3.1.

Además, en la Figura 5-5 se refleja el valor que obtiene la resolución en distancia con esta forma de onda.

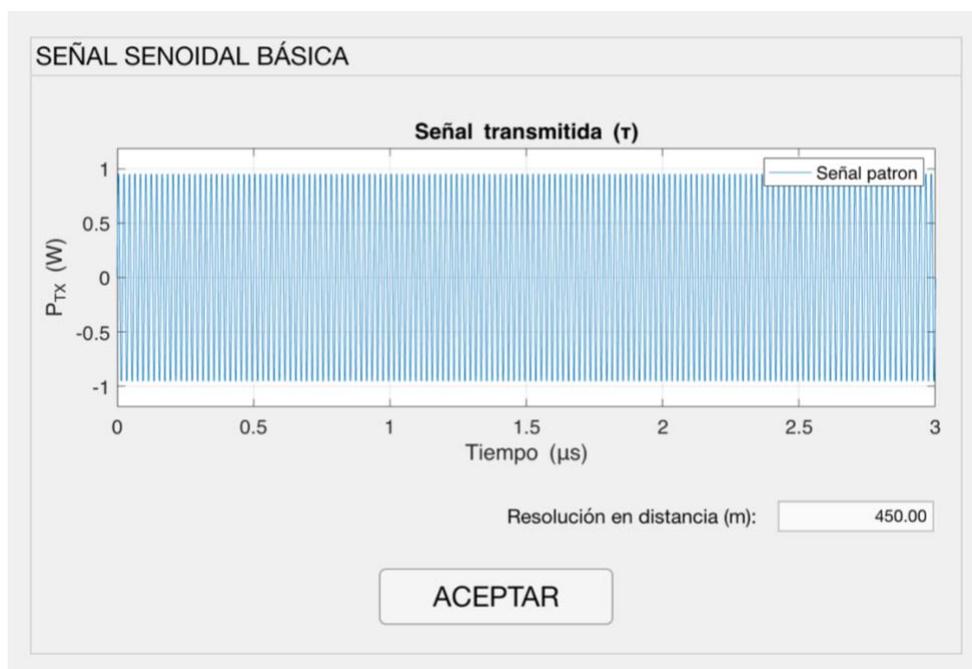


Figura 5-5 Configuración de la señal senoidal básica

### 5.3.2.2 Compresión en fase

El segundo botón corresponde con la generación de una señal modulada en fase. Cuando se pulsa, se abre una nueva ventana, que, por defecto, genera automáticamente una señal con compresión en fase con código Barker de 13 chips, como se muestra en la Figura 5-6.

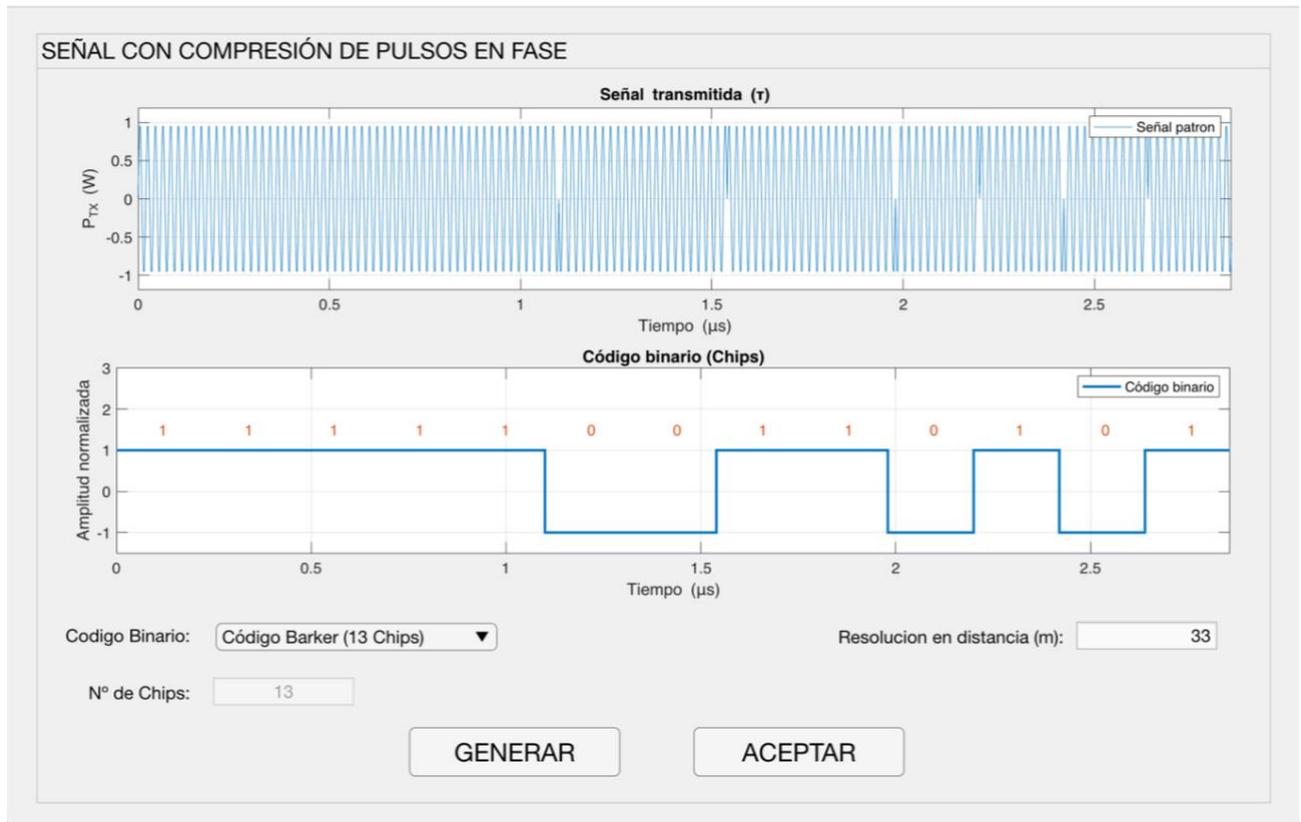


Figura 5-6 Configuración de la señal con compresión en fase

A diferencia de la señal senoidal, este panel cuenta con más opciones de configuración porque la señal modulada en fase precisa de un código binario para generarse. En este simulador se permite al usuario que pueda escoger que tipo de código binario desea implementar en la modulación de la señal. Entre los posibles se encuentran, código Barker de 7, 11, y 13 chips, y la configuración de un código pseudoaleatorio, con un número máximo de 128 chips.

Como se puede comprobar en la Figura 5-6, este menú muestra dos gráficas. La gráfica superior representa la señal modulada generada, muy útil a la hora de entender lo que es un cambio de fase entre un 0 y un 1 lógico. En la gráfica inferior, se representa la secuencia binaria del código que se haya establecido.

Asimismo, se puede seleccionar el código binario utilizado y visualizar la resolución en distancia que el sistema está adquiriendo en todo momento. De esta forma, el usuario puede comparar las prestaciones que proporcionan cada uno de estos tipos de modulaciones de señal, que depende del número de chips, es decir, del tamaño de la secuencia binaria.

En el caso de los códigos pseudoaleatorios, se permite seleccionar el número de chips a transmitir, y gracias al botón de “Generar”, cada vez que se pulse, se genera aleatoriamente un nuevo código binario, por si se diera el caso. Esto es necesario porque, al ser pseudoaleatorio, y aunque se presupone una cierta equiprobabilidad de símbolos binarios, puede darse el caso de que la secuencia generada contenga de muchos “1” o “0” seguidos, lo que redundaría en una pérdida de resolución (entre otras propiedades). Se ha establecido un máximo de 128 chips por pulso ya que tiene que haber como mínimo un periodo de portadora por chip. Esta limitación se aprecia en la Figura 5-7.

Una vez que se haya establecido el código hay que pulsar el botón “Generar” para ver representada la señal en las gráficas.

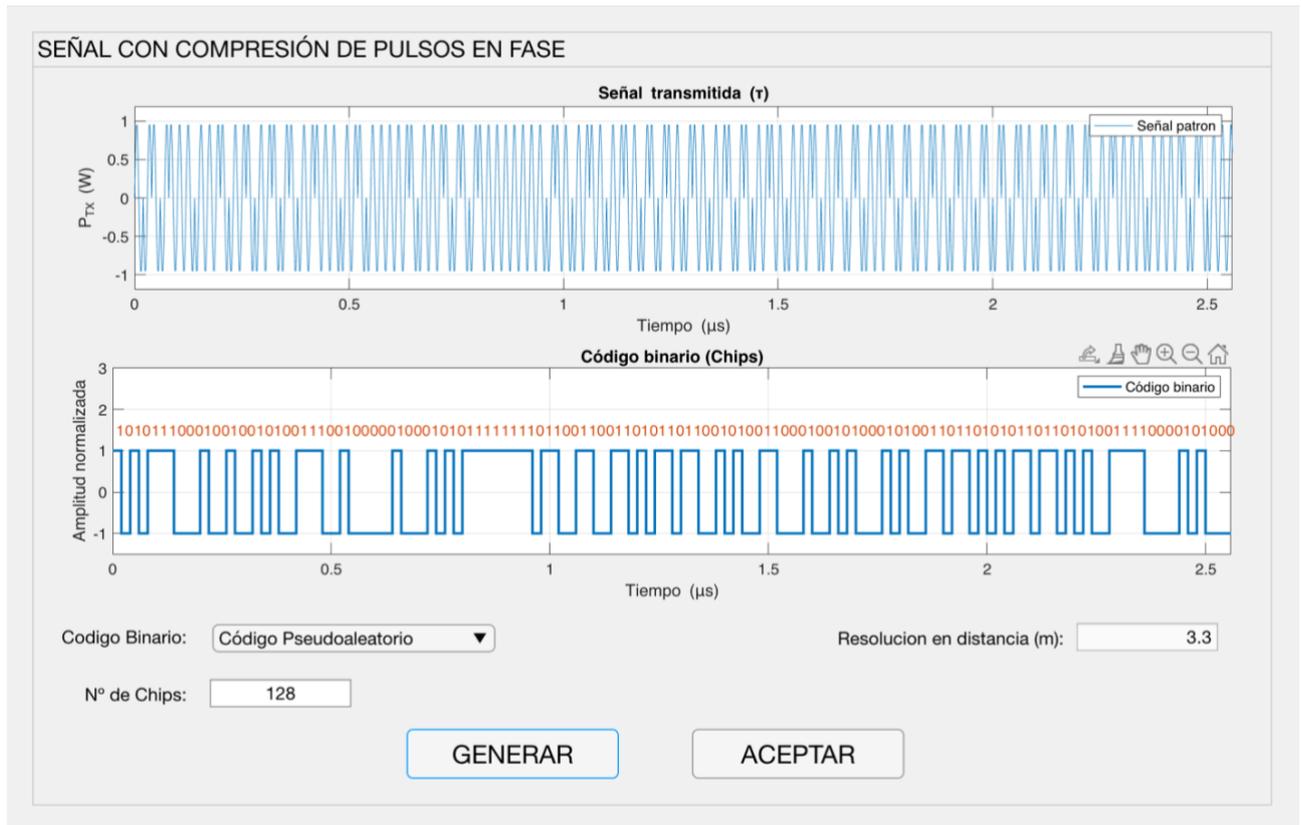


Figura 5-7 Código pseudoaleatorio de 128 chips

### 5.3.2.3 Compresión en frecuencia

El tercer y último botón de la ventana “Forma de Onda” es el de compresión en frecuencia o *chirping*, que abre la ventana que se muestra en la Figura 5-8.

Como se observa en la Figura 5-8, el parámetro que puede modificar el usuario a la hora de generar la señal modulada en frecuencia, es la excursión en frecuencia de la señal *chirp*.

Éste se puede configurar mediante un mando de selección discreto (*Discrete Knob*), donde sólo se puede cambiar entre cuatro valores preestablecidos, 10, 25, 50 y 100 MHz. Esta restricción se ha introducido debido a la elevada tasa de muestreo necesaria, que dificultaría la representación de señales con excursiones en frecuencia mayores. En cualquier caso, los valores permitidos son representativos de lo que sería un radar real, por lo que no se considera que esto represente una limitación del sistema.

Con el fin de que la configuración resulte lo más sencilla posible para el usuario, la señal *Chirp* se genera automáticamente al abrir la ventana y cada vez que el usuario modifica el mando de la excursión en frecuencia. Asimismo, la resolución en distancia se actualiza igualmente en tiempo real en el campo de la derecha.

También se puede usar el botón “Generar” por si el usuario quisiera estar seguro de que se ha actualizado correctamente la señal.

En caso de error al seleccionar el tipo de señal generada, siempre puede volver a seleccionar la que se quiera ya que el programa automáticamente sobrescribe los valores al entrar en alguno de los tres menús mostrados en la Figura 5-4.

Por lo tanto, la configuración final que se almacenará es la última configurada (o la última en pantalla) en el momento que se sale de la ventana de “Forma de Onda”.

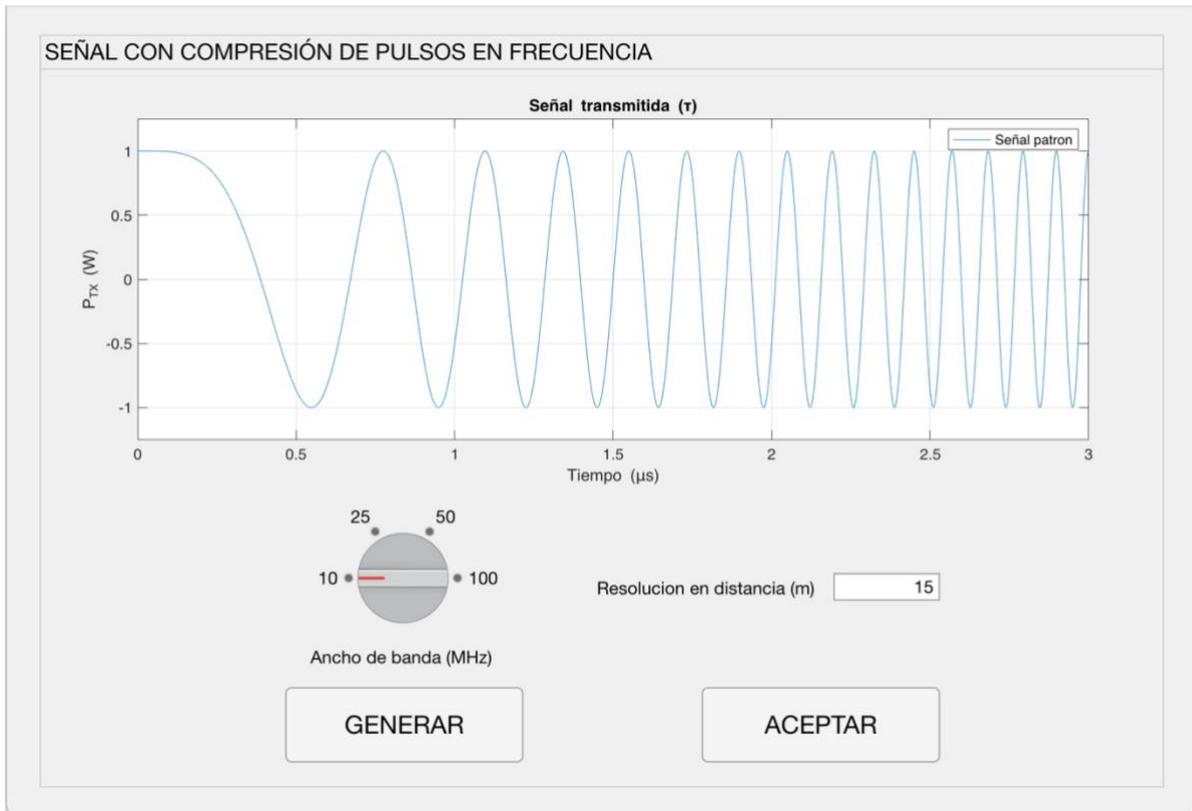


Figura 5-8 Configuración de la señal con compresión de pulsos en frecuencia

### 5.3.3 Antena

Una vez configurados los principales parámetros del transmisor y la forma de la onda transmitida, es necesario que el usuario tenga la posibilidad de modificar algunos parámetros de la antena que afectan a la detección.

La Figura 5-9 ilustra la ventana que se abre cuando el usuario pulsa el botón “Antena”. En ella se reflejan los parámetros que se pueden modificar. De esta forma, para modificar la ganancia, el usuario tiene la opción de escribir directamente el valor de la directividad en la dirección de máxima radiación (que deberá introducir en dB), o bien, dar valores al ancho de haz horizontal y al vertical que la definen. En este segundo caso, el programa calculará la directividad a partir de ambos parámetros.

Además, en la parte inferior, se puede modificar la velocidad de rotación, que definirá el nuevo número de pulsos transmitidos. Esto trae consigo una modificación en el módulo de integración de pulsos y en la probabilidad de detección.

Figura 5-9 Antena

### 5.3.4 Configuración Blancos

Tras haber configurado el transmisor y los parámetros de la antena, se deben configurar los blancos para comprobar si el sistema radar es capaz de detectarlos.

La Figura 5-10 ilustra la ventana de configuración de los blancos.

En la parte superior, hay un desplegable que permite seleccionar el número de blancos a configurar. Por defecto, el simulador se ejecuta con tres blancos ya configurados, y así poder hacer pruebas de manera rápida.

Este simulador permite hasta un máximo de cuatro, y, en función del número de blancos seleccionados por el usuario, se irán desbloqueando los campos para introducir los valores de distancia, RCS, altura, pérdidas por fluctuación, y las pérdidas debidas a la atenuación atmosférica.

El número de blancos se ha limitado a cuatro porque es el número mínimo que permite tener todas las configuraciones posibles de casos a analizar. Se debe tener en mente que éste es un simulador diseñado con fines docentes, y no es el objetivo programar un simulador radar real. Así, los blancos que aparecen en pantalla representan cuatro blancos que se encuentran sobre la misma demora (radial).

Se puede ampliar el número de blancos de forma sencilla adaptando el programa a tales efectos (por ejemplo, cargando los datos desde un fichero .MAT o un fichero de texto). Sin embargo, se decidió hacerlo de esta forma para que los alumnos que se inician en sistemas RADAR se encuentren con una interfaz intuitiva.

Una vez configurados los blancos, se pulsa el botón de “Guardar” para regresar al menú de configuración.

**CONFIGURACIÓN BLANCOS**

Número de Blancos 3 ▼

<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p style="text-align: center; margin: 0;"><b>BLANCO 1</b></p> <p>Distancia (R) <input style="width: 50px;" type="text" value="5000"/> m</p> <p>RCS <input style="width: 50px;" type="text" value="5000"/> m<sup>2</sup></p> <p>Altura RX <input style="width: 50px;" type="text" value="10"/> m</p> <p>Pérdidas SW <input style="width: 50px;" type="text" value="0"/> dB</p> <p>Atenuación atm. <math>\alpha</math> <input style="width: 50px;" type="text" value="0"/> dB/km</p> </div>	<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p style="text-align: center; margin: 0;"><b>BLANCO 2</b></p> <p>Distancia (R) <input style="width: 50px;" type="text" value="2000"/> m</p> <p>RCS <input style="width: 50px;" type="text" value="2000"/> m<sup>2</sup></p> <p>Altura RX <input style="width: 50px;" type="text" value="5"/> m</p> <p>Pérdidas SW <input style="width: 50px;" type="text" value="2"/> dB</p> <p>Atenuación atm. <math>\alpha</math> <input style="width: 50px;" type="text" value="0"/> dB/km</p> </div>
<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p style="text-align: center; margin: 0;"><b>BLANCO 3</b></p> <p>Distancia (R) <input style="width: 50px;" type="text" value="1850"/> m</p> <p>RCS <input style="width: 50px;" type="text" value="1850"/> m<sup>2</sup></p> <p>Altura RX <input style="width: 50px;" type="text" value="1"/> m</p> <p>Pérdidas SW <input style="width: 50px;" type="text" value="1"/> dB</p> <p>Atenuación atm. <math>\alpha</math> <input style="width: 50px;" type="text" value="0"/> dB/km</p> </div>	<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p style="text-align: center; margin: 0;"><b>BLANCO 4</b></p> <p>Distancia (R) <input style="width: 50px;" type="text" value="0"/> m</p> <p>RCS <input style="width: 50px;" type="text" value="0"/> m<sup>2</sup></p> <p>Altura RX <input style="width: 50px;" type="text" value="0"/> m</p> <p>Pérdidas SW <input style="width: 50px;" type="text" value="0"/> dB</p> <p>Atenuación atm. <math>\alpha</math> <input style="width: 50px;" type="text" value="0"/> dB/km</p> </div>

GUARDAR

**Figura 5-10 Configuración blancos**

### 5.3.5 Integración de pulsos

Este tipo de radar implementa un módulo de integración de pulsos coherente en los que se suman los pulsos recibidos en módulo y fase. La integración coherente, como ya se había comentado en el apartado 4.4.1, se realiza antes de la entrada al filtro adaptado, que es el momento en que se dispone de ambas informaciones.

Desde el menú principal, el usuario accede a la configuración mediante el botón denominado “Integrador Pulsos”.

La Figura 5-11 ilustra la ventana que se abre al ser pulsado el botón. En ella se hallan los diferentes parámetros de integración que pueden ser modificados.

El único parámetro configurable de esta ventana es la eficiencia de integración. Modificando este valor se puede ver su impacto en la probabilidad de detección a la hora de superar el umbral de detección.

La ventana muestra también el valor de los pulsos integrados, pero este parámetro no es modificable, ya que depende de la velocidad de la antena, como se ha comentado en el apartado 5.3.3. Si ésta ha sido modificada en la ventana anterior, automáticamente se mostraría el cambio realizado en el número de pulsos.



Figura 5-11 Configuración Integrador de pulsos

### 5.3.6 Enventanado

En el caso de que la forma de onda seleccionada sea compresión en fase, se hace necesario un paso adicional antes del detector, denominado enventanado, tal y como se comentó en el apartado 4.5.3.

Dependiendo de la forma de onda de la señal se realizarán enventanados o envolventes. Si la señal es de forma senoidal básica, se hace la envolvente y en función de los valores que superen el umbral de detección se considerarán blancos detectados, o no. Si la señal es modulada en fase antes de entrar en el detector, hay que realizarle un enventanado ya que reduce la probabilidad de falsa alarma. Para el enventanado, se puede escoger entre diferentes tipos de ventanas, usando por defecto *Chebyshev*, como se mencionó en el apartado 4.5.3. Por último, si la señal es modulada en frecuencia entra directamente tal y como es, en el detector.

La Figura 5-12 ilustra este módulo, en el que se aprecian dos gráficas, la superior corresponde con la señal que sale del filtro adaptado y la inferior corresponde con la señal que entra en el detector, ya enventanada o su envolvente, dependiendo de la forma de onda. En el caso de señal modulada en fase, se le habilita al usuario un panel a la izquierda donde puede cambiar el tipo de ventana y ver cómo se modifica la señal enventanada de cara a la futura detección. Si el usuario desconociese los tipos de ventana y en qué se diferencian, puede visualizar los tipos de ventanas disponibles, como ilustra la Figura 5-13.

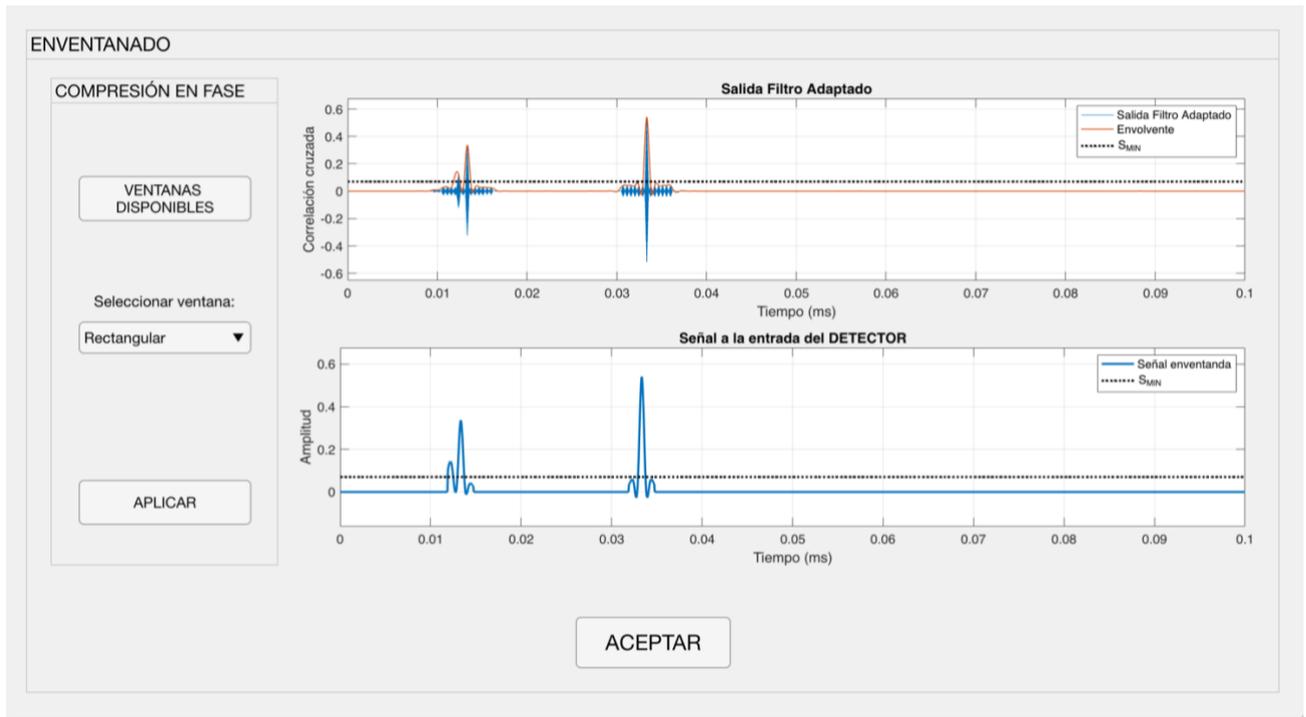


Figura 5-12 Enventanado

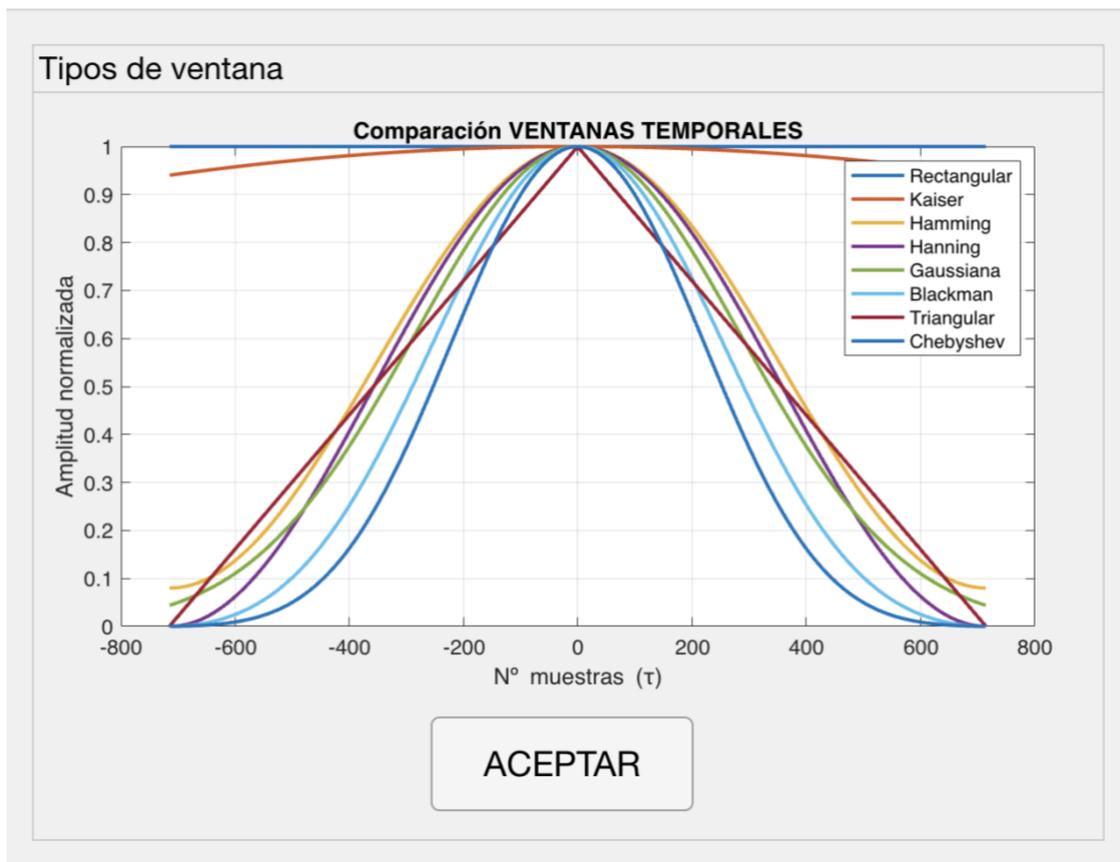


Figura 5-13 Comparación ventanas temporales

### 5.3.7 Representar Señal Transmitida

Cuando el usuario haya realizado todas las modificaciones que desee en el panel de configuración, puede visualizar los resultados y las gráficas de los diferentes módulos en el panel inferior de VISUALIZACIÓN.

En la esquina inferior izquierda de la Figura 5-2, se encuentra el botón “Señal transmitida”. La Figura 5-14 ilustra la ventana que se abre.

En ella se representa la señal transmitida, es decir, la señal patrón a lo largo del PRI. En la parte inferior derecha se visualiza la resolución en distancia que ha adquirido el sistema, ya que previamente se habrá escogido la forma de onda.

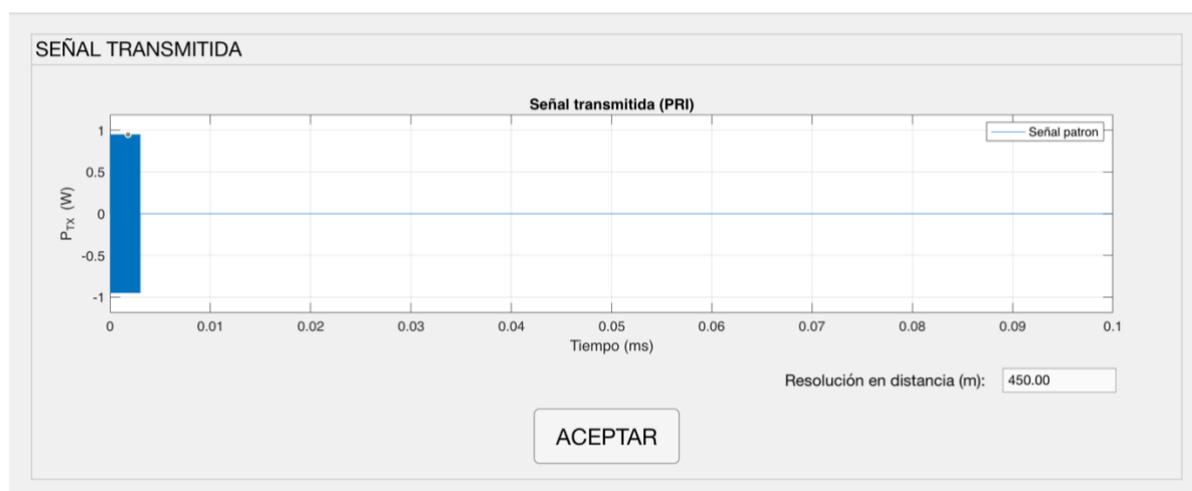


Figura 5-14 Señal Transmitida

### 5.3.8 Representar Blancos

Si el usuario quiere visualizar la señal recibida por el sistema, una vez configurados los blancos (y/o la forma de onda), puede pulsar en el botón “Blancos” del panel de visualización del menú. En la Figura 5-15 se observan las dos gráficas que se generan al abrir esta ventana. En la gráfica superior se representa la señal recibida de todos los blancos y en la gráfica inferior se representan las señales recibidas de cada uno de los blancos de forma independiente, de forma que el usuario pueda, visualmente, localizar cada uno de los blancos que ha configurado.

Ambas representaciones se muestran sin ruido añadido para facilitar la comprensión de la forma de onda recibida por parte de un alumno neófito en la materia, puesto que la suma de señales senoidales o *chirp* ya genera de por sí una señal recibida con apariencia poco común. El simulador añadirá el ruido al sistema tras este bloque, antes de entrar al integrador, de forma que se pueda ver el efecto de la adición de pulsos tanto en la señal (correlada) y en el ruido (incorrelado), como se muestra en el siguiente apartado.

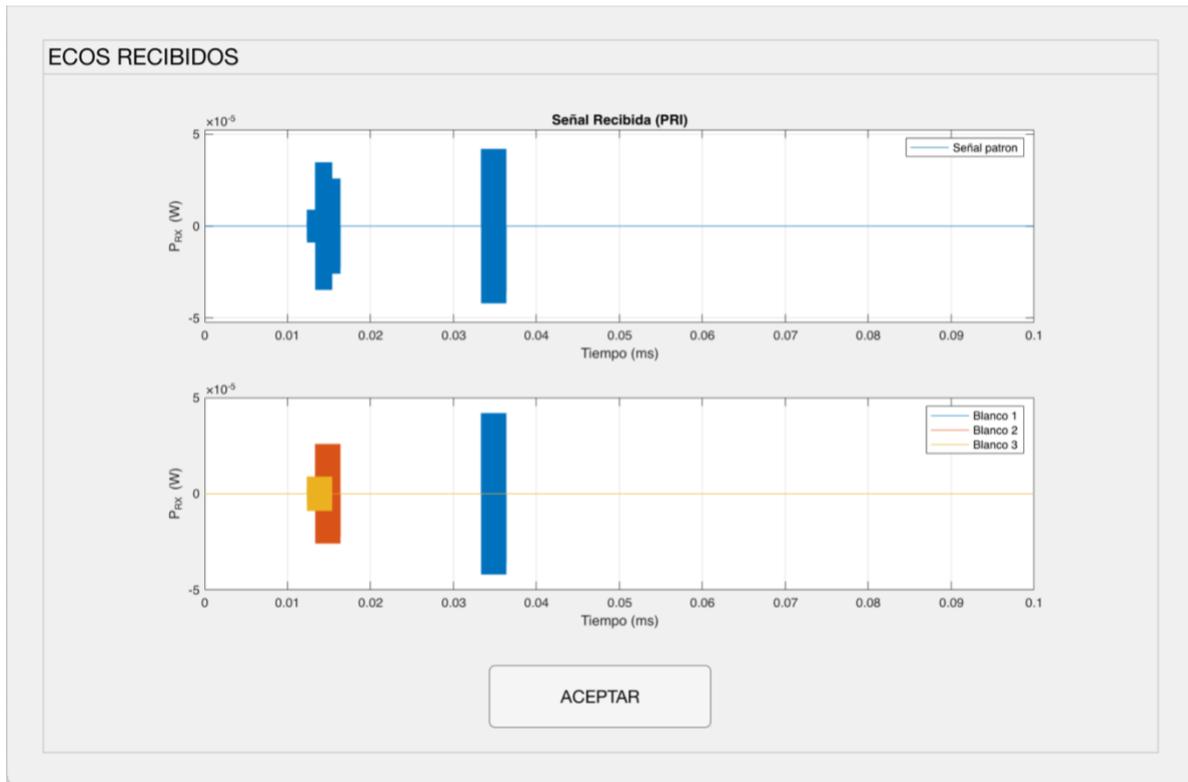


Figura 5-15 Representar Blancos

### 5.3.9 Representar integración de pulsos

Uno de los efectos buscados en este simulador docente es que el alumno/usuario sea consciente de la necesidad de incluir un integrador de pulsos para mejorar la detección del RADAR. Esta característica es la que lo diferencia del resto de simuladores comentados en el apartado 1 y se aprecia claramente en la Figura 5-16, donde se puede ver el número mínimo de pulsos necesarios para realizar una detección, cómo sube la señal según se van integrando más pulsos y el aumento del ruido de forma incorrelada a la señal.

Tras generar la señal integrada, si se desea visualizar la integración hay que acceder desde el menú al botón “Integración”, que pasará a estar habilitado. Al pulsar este botón, se abre una ventana con dos gráficas, mostradas en la Figura 5-16.

La gráfica superior muestra el resultado de la envolvente de la integración coherente. En ella, se pueden observar los pulsos recibidos, estando en la parte superior los de mayor potencia. Para una mejor visualización, no se representa la totalidad de las sumas parciales de pulsos recibidos, sino que se representa un máximo de 12 integraciones parciales, entre las que se cuentan la primera (1 Pulso, sin integración de ningún tipo) y la última ( $N_P$  pulsos). Así, se puede apreciar el aumento progresivo de la potencia recibida que ayuda a superar el umbral de detección.

En la segunda gráfica se realiza una comparación de la integración coherente y la incoherente si se aplicara esta última en este tipo de configuración radar. Gracias a esto, el usuario puede apreciar las diferencias que existen y analizar por qué principalmente se implementan integradores coherentes en los radares.

Cabe destacar que, aunque sólo se representa la envolvente, en realidad la salida del integrador conserva toda la información de módulo y fase, y es por ello, que se puede pasar al filtro adaptado, que comparará con la señal patrón transmitida donde se realizará la autocorrelación de las señales, dando como resultado los perfiles de los blancos.

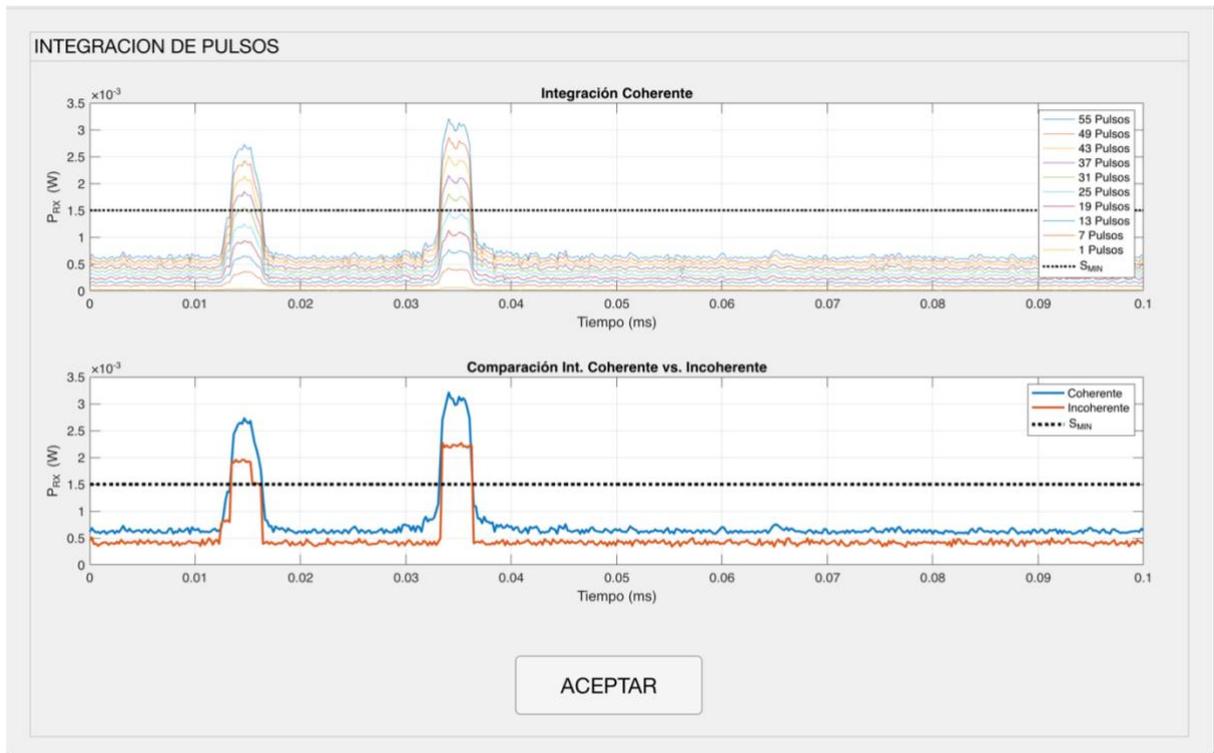


Figura 5-16 Integración de pulsos

### 5.3.10 Representar filtro adaptado

La señal integrada resultante (en módulo y fase) entra en el filtro adaptado donde tiene lugar la correlación cruzada con la señal patrón.

La Figura 5-17 ilustra la ventana que se abre cuando se pulsa en el botón “Filtro Adaptado”. En ella se observa la salida del filtro adaptado, en este caso, de la señal modulada en frecuencia o *chirping*, y se muestra con claridad que ha aumentado de forma considerable la resolución en distancia en comparación con respecto la simple señal senoidal, puesto que ahora, a diferencia de la Figura 4-11 el radar sería capaz de apreciar, sin ambigüedad, los tres blancos seleccionados por defecto.

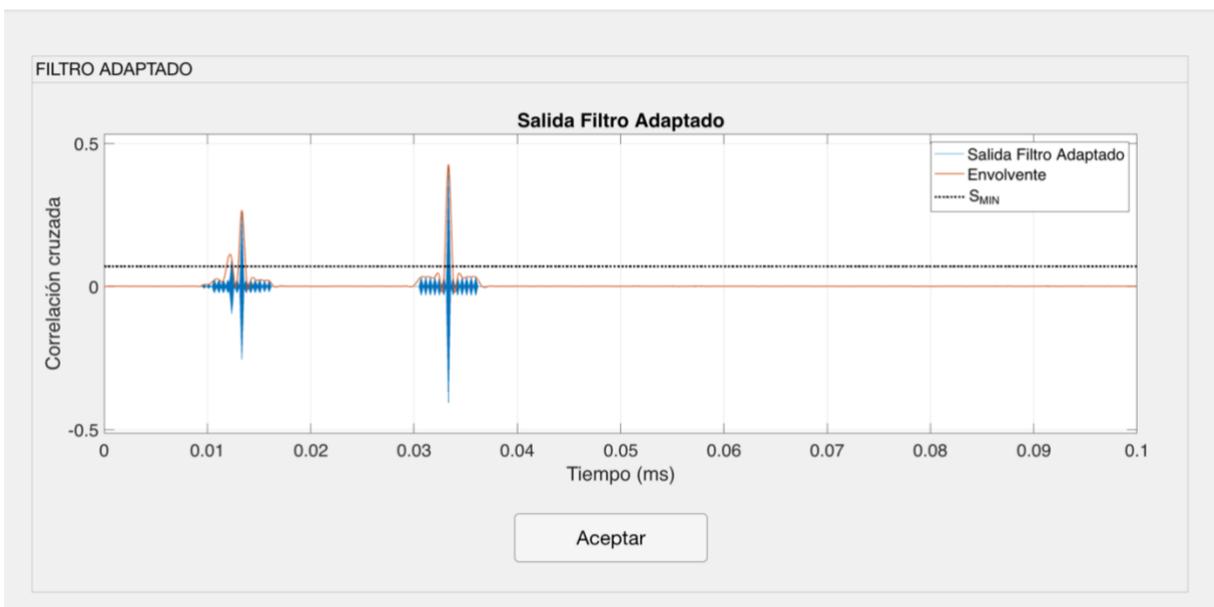


Figura 5-17 Filtro adaptado

### 5.3.11 Detector

La señal resultante del enventanado (o la envolvente en caso de no disponer de compresión en fase) pasa al detector, donde se establece el umbral de detección y se calcula el número de blancos detectados, los valores de distancia estimada, las potencias recibidas de cada uno de ellos, y su RCS estimada.

En la Figura 5-18 se aprecia la ventana que se abre cuando se pulsa el botón “Detector”. En la parte superior, se muestran la cantidad de blancos que, con las características y parámetros introducidos, y el tipo de compresión de pulsos implementado, se han sido capaz de detectar.

En la parte central e inferior de la Figura 5-18 se muestran todos los datos estimados de los blancos. En el caso representado, han sido detectados dos blancos, y los datos de distancia, potencia recibida y RCS estimadas se reflejan en la propia ventana.

**DETECTOR**

Número de blancos estimados:

<p><b>BLANCO 1</b></p> <p>Distancia (R) <input style="width: 50px;" type="text" value="2215"/> m</p> <p>Potencia recibida <input style="width: 50px;" type="text" value="0.5524"/> mW</p> <p>RCS estimada <input style="width: 50px;" type="text" value="740.92"/> m<sup>2</sup></p>	<p><b>BLANCO 2</b></p> <p>Distancia (R) <input style="width: 50px;" type="text" value="5214"/> m</p> <p>Potencia recibida <input style="width: 50px;" type="text" value="0.5476"/> mW</p> <p>RCS estimada <input style="width: 50px;" type="text" value="35773.72"/> m<sup>2</sup></p>
<p><b>BLANCO 3</b></p> <p>Distancia (R) <input style="width: 50px;" type="text" value="0"/> m</p> <p>Potencia recibida <input style="width: 50px;" type="text" value="0.0000"/> mW</p> <p>RCS estimada <input style="width: 50px;" type="text" value="0.00"/> m<sup>2</sup></p>	<p><b>BLANCO 4</b></p> <p>Distancia (R) <input style="width: 50px;" type="text" value="0"/> m</p> <p>Potencia recibida <input style="width: 50px;" type="text" value="0.0000"/> mW</p> <p>RCS estimada <input style="width: 50px;" type="text" value="0.00"/> m<sup>2</sup></p>

**Figura 5-18 Detector**

## 5.4 Radar con integración incoherente

Como se ha comentado anteriormente en el apartado 5.2, al arrancar la aplicación el usuario tiene la posibilidad de elegir entre dos tipos de configuración radar. El primero de ellos, descrito en el apartado anterior, incorpora integración de pulsos coherente y filtro adaptado donde se realiza la correlación cruzada con la señal patrón transmitida.

En cambio, si el usuario escoge la segunda opción, y le da al botón “SIGUIENTE”, se abre una nueva ventana como la que se ilustra en la Figura 5-19. Este segundo radar el diagrama de bloques difiere del anterior en dos puntos principales: incorpora un módulo de integración incoherente y no dispone de filtro adaptado. En la actualidad, los integradores no coherentes suelen denominarse de postdetección porque suelen incluirse tras el filtro adaptado. En este caso, la implementación de este sistema es más simple, porque el fin último es facilitar al usuario la comprensión de las principales diferencias entre los dos tipos de integración.

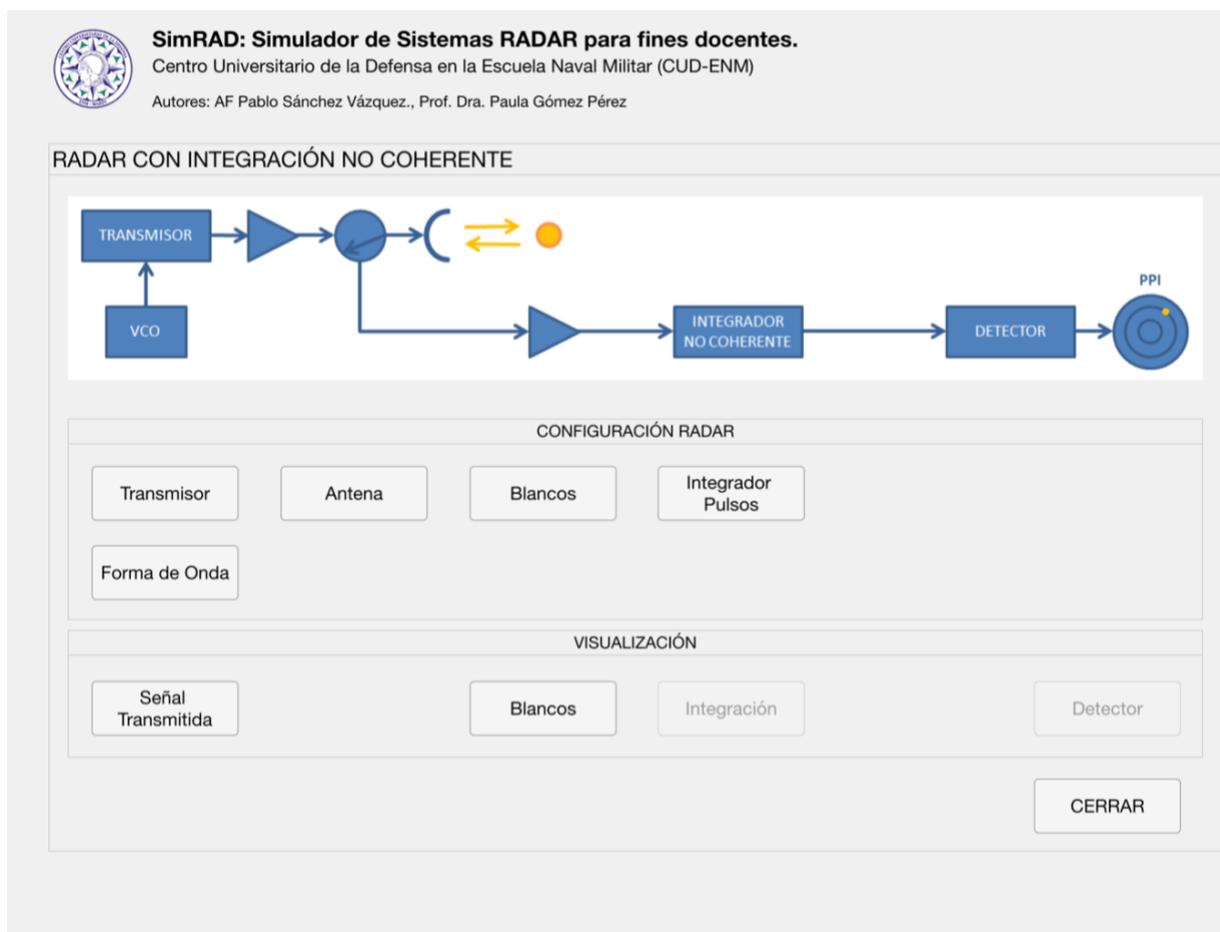


Figura 5-19 Radar con integración incoherente

Al igual que en el radar con integración coherente, se divide en dos secciones, el panel de configuración en la parte central y el panel de visualización en la parte inferior. A excepción del módulo de integración, el resto de botones y menú de configuración son idénticos al caso anterior, por lo que no se reincidirá en ellos en este apartado.

Esto significa que, a pesar de no disponer de filtro adaptado, se permite que el usuario module la señal transmitida utilizando compresión en fase o en frecuencia. De esta forma, el alumno neófito en sistemas radar puede ver el impacto resultante de no implementar un sistema de correlación cruzada con la señal transmitida.

### 5.4.1 Configuración integración incoherente

Este tipo de radar implementa un módulo de integración de pulsos incoherente en los que se suman las envolventes de las señales recibidas de los pulsos integrados.

Desde el menú principal, el usuario accede a la configuración mediante el botón denominado “Integrador Pulsos” que se encuentra en el panel de configuración.

La Figura 5-20 ilustra la ventana que se abre al ser pulsado el botón. En ella se hallan los diferentes parámetros de integración que pueden ser modificados.

El único parámetro configurable de esta ventana es la eficiencia de integración. En comparación con la Figura 5-11 (configuración del módulo de integración coherente), el valor modificable de la eficiencia, corresponde con la eficiencia de la integración incoherente, que suele ser menor del 75%. Modificando este valor se puede ver su impacto en la probabilidad de detección a la hora de superar el umbral de detección.

De igual modo que en el apartado 5.3.5, la ventana muestra también el valor de los pulsos integrados, pero este parámetro no es modificable, ya que depende de la velocidad de la antena, como se ha comentado en el apartado 5.3.3. Si ésta ha sido modificada en la ventana anterior, automáticamente se mostraría el cambio realizado en el número de pulsos.



Figura 5-20 Configuración integración de pulsos incoherente

### 5.4.2 Representar integración no coherente

De la misma forma que en la Figura 5-16, en la Figura 5-21 se aprecia claramente el número mínimo de pulsos necesarios para realizar una detección y cómo la potencia recibida va aumentando según se incrementa el número de pulsos integrados. De este modo, se puede apreciar el aumento progresivo de la potencia recibida que ayuda a superar el umbral de detección.

Debido a la eficiencia de la integración incoherente (que suele ser menor del 80%), se observa que el número mínimo de pulsos para lograr una detección es mayor al del apartado 5.3.9. Como en la

representación de la integración coherente, se muestran también un máximo de 12 integraciones parciales.

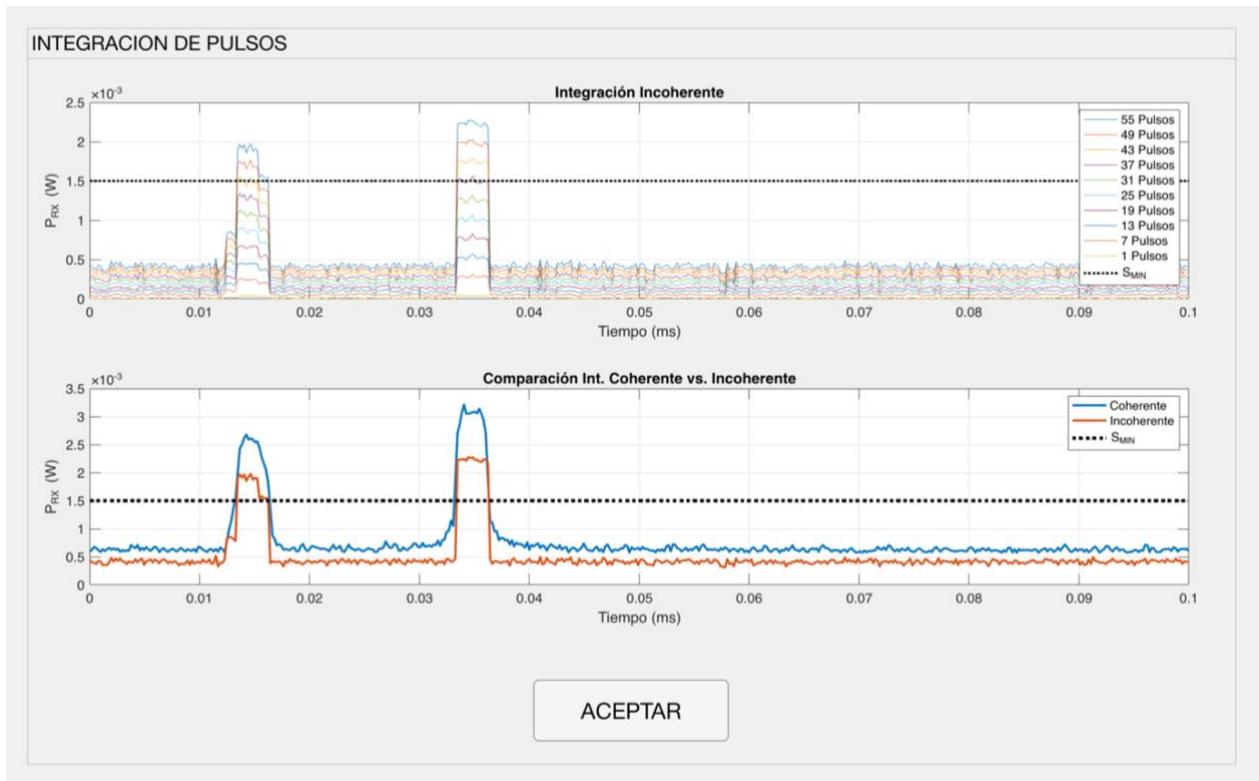


Figura 5-21 Integración de pulsos incoherente

Tras pasar la señal por el integrador de pulsos no coherente, se pasa directamente por el detector, donde se estimarán los valores de distancia, potencia recibida y RCS de los diferentes blancos detectados.

La señal resultante de la integración no coherente pasa al detector, donde en función del umbral de detección se calculan, el número de blancos detectados, los valores de distancia estimada, las potencias recibidas de cada uno de ellos, y sus RCS estimadas, de igual forma como se había comentado en el apartado 5.3.11.



## 6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 6.1 Conclusiones

En este trabajo se ha mejorado el simulador de radares pulsados (SimRAD) gracias a la implementación de una serie de funcionalidades que aumentan con creces las capacidades de las que disponía.

A simple vista, se ha cambiado la interfaz gráfica, implementando una mucho más intuitiva y agradable para el usuario. Además, la interfaz está organizada para que ayude a la comprensión de los conceptos relacionados con la teoría radar, y conseguir que quien lo utilice interiorice el funcionamiento completo de estos sistemas.

Asimismo, se ha mejorado el módulo de integración de pulsos, siendo ahora configurable y más didáctico. Se ha implementado un módulo de compresión de pulsos en frecuencia y en fase, que ha conseguido mejorar la resolución en distancia notablemente y un módulo de filtro adaptado donde se realiza la correlación de las señales.

Este simulador es totalmente configurable y permite al usuario crear diferentes escenarios con un distinto número de blancos y parámetros, para corroborar que el sistema es capaz de detectarlos, y si no, modificar los valores suficientes para que así sea.

Por lo tanto, se espera que este simulador sea de gran ayuda en el proceso de adquisición de los conocimientos necesarios para todos aquellos futuros operarios del radar.

### 6.2 Líneas futuras

Este trabajo emana de la idea de aumentar las capacidades del simulador SimRAD de radares pulsados con una serie de funcionalidades que lo hacen exclusivo dentro del ámbito de los simuladores docentes.

Debido a que es un trabajo limitado en tiempo, existen multitud de opciones, módulos, y características que no han sido implementadas ya que no eran objeto de este TFG. Este hecho da lugar a multitud de líneas futuras, algunas de las cuales se citan a continuación:

- Incluir una pantalla PPI que ayude principalmente a la comprensión de las celdas de resolución, y que el simulador tuviera capacidad omnidireccional, en vez de trabajar únicamente en una demora (radial).

- Implementar la generación de *clutter* y de diversas modalidades de filtrado MTI (*Moving Target Indicator*) que permitan eliminar el ruido del entorno radar y comprender mejor dicha funcionalidad de un radar real.
- Implantación de un módulo que permita la obtención de perfiles de alta resolución de los blancos configurados, y que sea capaz de diferenciar los dispersores que existen, habiendo previamente configurado la plataforma a detectar.
- Añadir la superposición de la pantalla PPI con la carta náutica en diferentes escenarios para que se parezca más a un radar a bordo de los buques, simulando la costa próxima.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. I. Skolnik, *Introduction to RADAR systems* Third Edition, Mc Graw Hill Education, 2001.
- [2] M. Hollmann, «Radar World,» 2007. [En línea]. Disponible: <http://www.radarworld.org/england.html>.
- [3] C. Historia, «Curiosfera,» 20 enero 2021. [En línea]. Disponible: <https://curiosfera-historia.com/quien-invento-el-radar-historia/>. [Último acceso: 25 enero 2021].
- [4] U. S. S. D. Centre, «UK Solar System Data Centre,» 08 diciembre 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.ukssdc.ac.uk/ionosondes/history/watsonwatt.html>.
- [5] D. Barrett, «Radarpages,» 2000. [En línea]. Disponible: <http://www.radarpages.co.uk/people/watson-watt/watson-watt.htm>.
- [6] E. N. d. P. ". L. P. Buena", «Simulador de Navegación Observador Radar,» Mar de Plata, 2007.
- [7] G. R. Curry, *Radar Essentials, A Concise Handbook for Radar Design and Performance Analysis*, Scitech, 2012.
- [8] Unión Internacional de Comunicaciones, «RECOMENDACIÓN UIT-R P.530-13. Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa,» Ginebra, 2010.
- [9] Unión Internacional de Telecomunicaciones , «RECOMENDACIÓN UIT-R P.840-8. Atenuación debida a las nubes y a la niebla,» Ginebra, 2020.
- [10] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «RECOMENDACIÓN UIT-R P.838-3. Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción,» Ginebra, 2005.
- [11] J. A. S. W. A. H. Mark A. Richards, *Principles of Modern Radar Basic*, Scitech, 2010.
- [12] Cambridge Pixel Ltd, «SPx Radar Simulator,» 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.cambridgepixel.com/products/simulation-recording/spx-radar-simulator/>. [Último acceso: 12 febrero 2021].
- [13] P. ARPA, «Buffalo Computer Graphics,» [En línea]. Disponible: [https://www.buffalocomputergraphics.com/content/documents/Maritime/PCRadAr\\_A RPA.pdf](https://www.buffalocomputergraphics.com/content/documents/Maritime/PCRadAr_A RPA.pdf). [Último acceso: 12 febrero 2021].

- [14] S. D. L. D. León, «Diseño e implementación de un entrenador radar básico en Matlab, para radares pulsados,» TFG CUD UVigo, Marín, Pontevedra, 2015.
- [15] R. H. Barker, "Group Synchronizing of Binary Digital Systems". Communication Theory, Londres: Butterworth, 1953.

