



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis espectral de blancos móviles en radar pulsado

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Alejandro Porres García

DIRECTOR: José González Coma

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis espectral de blancos móviles en radar pulsado

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El análisis espectral de blancos móviles en un radar pulsado constituye una herramienta fundamental en el ámbito de la navegación marítima, ya que permite caracterizar y comprender el entorno dinámico que rodea a una embarcación en movimiento. A través del estudio de los espectros generados por los ecos reflejados de objetos móviles —tales como otras embarcaciones—, es posible obtener información crítica sobre sus velocidades relativas y trayectorias. Esta capacidad de detección y análisis es esencial para la toma de decisiones en tiempo real, especialmente en situaciones de riesgo potencial, como maniobras de evasión y prevención de abordajes en la mar.

En este contexto, el presente trabajo se orienta al diseño y desarrollo de una interfaz gráfica interactiva implementada en Matlab, cuyo objetivo es facilitar la simulación del comportamiento de un radar pulsado ante la presencia de blancos móviles. La herramienta permite al usuario modificar de forma flexible diversos parámetros del radar. A medida que estos parámetros se ajustan, la interfaz representa de manera gráfica y en tiempo real los espectros resultantes, tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia. Esto proporciona una comprensión visual e intuitiva del impacto que tienen las configuraciones del radar sobre la detección y caracterización de blancos móviles, y constituye un recurso pedagógico y analítico valioso en el estudio del comportamiento espectral en sistemas radar pulsados.

PALABRAS CLAVE

Transformada de Fourier, Teorema de Nyquist, frecuencia Doppler, Tasa de repetición de pulsos (PRF), tiempo discreto.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a todos los compañeros de promoción, familia y amigos que me han apoyado durante el desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
1 Introducción y objetivos	5
1.1 Introducción y motivación	5
1.2 Objetivos	6
1.3 Estructura	6
2 Estado del arte	8
2.1 Invención del radar	8
2.1.1 Contribución a la invención del radar	8
2.1.2 Desarrollo y evolución de la tecnología radar	10
2.2 Definición de radar	10
2.2.1 Propagación de las ondas electromagnéticas	11
2.2.2 Interacción con los cuerpos	12
2.3 Componentes que conforman un radar pulsado	13
2.3.1 Sincronizador	14
2.3.2 Transmisor	14
2.3.3 Receptor	16
2.3.4 Procesador de señales	16
2.3.7 PRF/PRI	19
2.3.8 Diagrama de radiación	19
2.3.9 Ancho de haz	20
2.3.10 Potencias de trabajo	20
2.3.11 Ganancia	21
2.4 Efecto Doppler	21
2.4.1 Naturaleza del efecto Doppler	21
2.4.2 Efecto Doppler en radar pulsado	22
2.5 Ventajas del radar pulsado	22
2.5.1 Ventajas generales	22
2.5.2 Ventajas en el ámbito militar	23
3 Desarrollo del TFG	24
3.1 Secuencia a seguir	24
3.2 Fundamentos matemáticos	25
3.2.1 Transformada de Fourier	25
3.2.2 Espectro radar de un blanco	26

3.2.3 Teorema de Nyquist.....	28
3.2.4 Velocidad máxima no ambigua	30
3.2.5 Convolución.....	32
3.3 Transformación de datos continuos a tiempo discreto	33
3.3.1 Transformada de Fourier en tiempo discreto	34
3.3.2 Función delta de Dirac	34
3.3.3 Propiedades de Fourier	35
3.4 Interfaz	37
3.4.1 Funciones principales	38
4 Resultados / Validación / Prueba.....	45
4.1 Resultados obtenidos.....	45
4.1.1 Interfaz Teorema de Nyquist	45
4.1.3 Interfaz Transformada de Fourier	50
5 Conclusiones y líneas futuras	54
5.1 Evaluación de los objetivos.....	54
5.2 Líneas futuras	55
6 Bibliografía.....	56
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	59
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	60
Anexo III: Código de la interfaz radar	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Experimento de Hertz [3].	9
Figura 2-2 Telemobiloscopio	10
Figura 2-3 Onda electromagnética [11].	11
Figura 2-4 Onda refractada (a) [14]. Onda reflejada (b) [15].	12
Figura 2-5 RCS de un blanco dependiendo de su geometría	13
Figura 2-6 Componentes del RADAR pulsado [19].	14
Figura 2-7 Modulaciones de una onda [22].	15
Figura 2-8 Tarea del duplexor en el sistema RADAR	15
Figura 2-9 Parámetros de una onda. Eje de distancia (a). Eje de tiempo (b)	17
Figura 2-10 Bandas de frecuencia IEEE/ RADAR/ OTAN	18
Figura 2-11 Ecuación de una onda [27].	19
Figura 2-12 Diagrama de radiación de una antena en coordenadas polares [30].	20
Figura 2-13 Potencia media, potencia de pico, ciclo de trabajo	21
Figura 3-1 Pulso rectangular	26
Figura 3-2 Transformada de Fourier	26
Figura 3-3 Espectro radar de un blanco estático	27
Figura 3-4 Espectro radar de un blanco en movimiento	27
Figura 3-5 $f_s = 2 \cdot f$	28
Figura 3-6 $f_s = 8 \cdot f$	29
Figura 3-7 $f_s = 100 \cdot f$	30
Figura 3-8 Frecuencia normalizada generada por un blanco a 25m/s	31
Figura 3-9 Frecuencia normalizada generada por un blanco a 60m/s	32
Figura 3-10 Señal $f(t)$	33
Figura 3-11 Señal $g(t)$	33
Figura 3-12 Convolución lineal $f(t) \cdot g(t)$	33
Figura 3-13 Función delta de Dirac	35
Figura 3-14 Tren de pulsos en dominio de frecuencia	37
Figura 3-15 Tren de pulsos en el dominio del tiempo	37
Figura 3-16 Datos del usuario	38
Figura 3-17 Datos del usuario. Desplegable del grupo	38
Figura 3-18 Datos del usuario. Desplegable del cuerpo	39
Figura 3-19 Interfaz del radar	39
Figura 3-20 Interfaz del radar. Datos del usuario	39
Figura 3-21 Interfaz del radar. Ventanas de Nyquist y Velocidad máxima no ambigua	40

Figura 3-22 Interfaz del radar. Panel de controles Nyquist.....	40
Figura 3-23 Interfaz del radar. Gráfico del Teorema de Nyquist.....	41
Figura 3-24 Interfaz del radar. Presentación ventana de velocidad máxima no ambigua	41
Figura 3-25 Interfaz del radar. Panel de controles Velocidad máxima no ambigua	42
Figura 3-26 Interfaz del radar. Gráfica velocidad máxima no ambigua.....	42
Figura 3-27 Interfaz del radar. Transformada de Fourier	43
Figura 3-28 Interfaz del radar. Transformada de Fourier. Panel de controles.	44
Figura 4-1 Interfaz de Nyquist de partida.....	46
Figura 4-2 Frecuencia de muestreo = Frecuencia de la señal.....	46
Figura 4-3 Frecuencia de muestreo = 32 x Frecuencia de la señal.....	47
Figura 4-4 Periodo de muestreo = 10	47
Figura 4-5 Señal recibida con los datos de partida.....	48
Figura 4-6 Blanco a 80m/s. PRF y frecuencia de la señal valores iniciales.	49
Figura 4-7 Velocidad del blanco = 80m/s, PRF = 200Hz, Frecuencia de la señal no varía respecto al principio	49
Figura 4-8 Pulso en el dominio del tiempo. Valores iniciales.....	50
Figura 4-9 Pulso en el dominio frecuencial. Valores iniciales.	51
Figura 4-10 Pulso en el dominio del tiempo. N.º de muestras = 5, ancho de pulso = 3s.	51
Figura 4-11 Pulso en el dominio frecuencial. N.º de muestras = 5, ancho de pulso = 3s.	52
Figura 4-12 Pulso en el dominio del tiempo. N.º de muestras = 5, ancho de pulso = 4s.	52
Figura 4-13 Pulso en el dominio frecuencial. N.º de muestras = 5, ancho de pulso = 4s.	53

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción y motivación

Desde tiempos remotos, el ser humano ha experimentado la necesidad de desarrollar tecnologías que le permitan extender sus capacidades sensoriales, particularmente en entornos donde la percepción visual directa es limitada e ineficaz. Uno de los entornos más exigentes en este sentido es el medio marítimo, caracterizado por su vastedad, condiciones meteorológicas cambiantes y escasa visibilidad, factores que dificultan la navegación segura y eficiente. En este contexto, la aparición del radar (*Radio Detection and Ranging*) supuso una revolución tecnológica, al ofrecer la posibilidad de detectar, localizar y seguir objetos a distancia mediante la emisión y recepción de ondas electromagnéticas.

La necesidad de disponer de un sistema de detección fiable en alta mar es crítica, ya que permite identificar obstáculos, otras embarcaciones y posibles amenazas en tiempo real, incluso en ausencia de visibilidad óptica. Este tipo de sistema no solo incrementa la seguridad en la navegación, sino que también permite optimizar la toma de decisiones tácticas y estratégicas, tanto en escenarios civiles como militares. En el ámbito civil, el radar es indispensable para prevenir colisiones, gestionar el tráfico marítimo, asistir en maniobras portuarias y facilitar la navegación costera y oceánica. En el ámbito militar, su utilidad se amplía considerablemente, siendo un componente esencial en tareas de vigilancia, defensa, navegación táctica y apoyo a operaciones de combate. La capacidad de determinar con precisión parámetros como la posición, velocidad, rumbo y firma espectral de otras unidades navales u objetos flotantes proporciona a los operadores una ventaja decisiva en la evaluación del entorno operativo.

Pese a la amplia difusión de los sistemas radar y al extenso cuerpo teórico que respalda su funcionamiento, se detecta una carencia en la enseñanza aplicada de estos conocimientos. La formación técnica en muchas ocasiones se centra en contenidos abstractos y altamente formales, que, si bien son fundamentales para entender el funcionamiento físico del radar, pueden resultar difíciles de interiorizar sin el apoyo de herramientas prácticas que los contextualicen. Es en este punto donde se plantea la necesidad de desarrollar recursos que permitan una comprensión más tangible de los principios involucrados en la detección de blancos móviles mediante radar pulsado.

Este trabajo responde precisamente a esa necesidad, proponiendo el diseño e implementación de una interfaz gráfica interactiva que simula el comportamiento del radar ante la presencia de blancos móviles. La herramienta permite al usuario experimentar en tiempo real los efectos que tiene la variación de parámetros como la frecuencia de repetición de pulsos (PRF), la duración del pulso, o la frecuencia portadora, entre otros, sobre la representación espectral de los ecos recibidos. Mediante esta visualización, se busca facilitar el entendimiento de conceptos clave como el efecto Doppler, la velocidad máxima no ambigua, el *aliasing* espectral o la resolución temporal y frecuencial del sistema.

Esta aproximación práctica no solo favorece la asimilación de contenidos complejos, sino que también incrementa la motivación del alumno al permitirle experimentar de forma directa con los fundamentos teóricos estudiados. En el caso particular de la formación de futuros oficiales de la Armada, este tipo de herramientas cobra especial relevancia, ya que promueve un aprendizaje activo y orientado a la realidad operativa, preparando al estudiante para enfrentarse con mayor solvencia a situaciones reales de navegación y toma de decisiones tácticas en entornos navales. En este sentido, el desarrollo de este tipo de recursos se convierte en una motivación pedagógica clave para formar profesionales más competentes, seguros y eficaces en el ejercicio de sus funciones.

1.2 Objetivos

El presente trabajo tiene como principal el diseño e implementación de una herramienta interactiva desarrollada en el entorno de programación Matlab, orientada a la simulación y análisis del comportamiento espectral de un radar pulsado ante la presencia de blancos móviles. Esta herramienta está concebida con fines didácticos y formativos, con el propósito de facilitar la comprensión de los efectos que la modificación de determinados parámetros del radar tiene sobre la información obtenida a través de los ecos reflejados,

Entre los objetivos específicos que se persiguen se encuentra el desarrollo de una interfaz gráfica intuitiva y funcional, que permita al operador modificar en tiempo real distintos parámetros del sistema radar. A través de esta interacción, el usuario podrá observar de forma inmediata las consecuencias de dichas variaciones en las representaciones gráficas obtenidas tanto en el dominio temporal como en el dominio frecuencial, lo que permitirá analizar fenómenos como el efecto Doppler, la velocidad máxima no ambigua o el *aliasing* Doppler.

Asimismo, otro de los objetivos fundamentales de este trabajo es proporcionar una herramienta que no solo muestre los resultados de forma visual, sino que además fomente la interpretación crítica de los datos presentados. La capacidad del operador para interpretar correctamente los gráficos generados será clave para consolidar el aprendizaje de conceptos fundamentales en el ámbito del radar pulsado y su aplicación práctica en contextos reales.

En conjunto, este trabajo busca contribuir a una formación más aplicada e intuitiva en el campo del análisis espectral en radares pulsados, reforzando los conocimientos teóricos mediante experiencias prácticas interactivas que resulten útiles para la preparación técnica de futuros profesionales, especialmente en el ámbito de la defensa y la navegación marítima.

1.3 Estructura

En cuanto a la estructura del presente trabajo, este se encuentra dividido en cinco secciones fundamentales, organizadas de manera progresiva para facilitar la comprensión del problema abordado, así como de los métodos empleados y los resultados obtenidos.

La primera parte, correspondiente al Capítulo 1, constituye una introducción general al tema de estudio. En ella se expone el contexto del problema, la motivación que impulsa este trabajo y los objetivos principales que se persiguen con su desarrollo.

La segunda parte, contenida en el Capítulo 2, se estructura a su vez en seis secciones, cada una de las cuales aborda distintos aspectos teóricos esenciales para la comprensión del radar pulsado. En la Sección 2.1 se analiza la evolución histórica de la tecnología radar, desde sus orígenes hasta sus aplicaciones contemporáneas. La Sección 2.2 introduce los conceptos fundamentales sobre la propagación de ondas electromagnéticas y su interacción con distintos tipos de superficies. La Sección 2.3 describe detalladamente los componentes que conforman un radar pulsado. En la Sección 2.4 se presenta una clasificación de los sensores en función de su naturaleza física, su fuente de energía y el entorno operativo en el que se emplean. Posteriormente, en la Sección 2.5, se examinan las principales

aplicaciones y ventajas del radar pulsado en el ámbito civil, mientras que en la Sección 2.6 se analizan sus beneficios y aplicaciones estratégicas en el ámbito militar.

La tercera parte, desarrollada en el Capítulo 3, expone la metodología seguida para la implementación del proyecto. Se detallan la secuencia lógica de desarrollo, los fundamentos matemáticos empleados, la formulación de una ecuación adaptada al tratamiento de señales en tiempo discreto y el proceso de diseño de la interfaz gráfica interactiva en Matlab.

La cuarta parte, abordada en el Capítulo 4, se centra en el análisis crítico de los resultados obtenidos mediante la interfaz desarrollada. Se evalúa la influencia de los distintos parámetros del radar en las representaciones gráficas obtenidas y se interpretan los efectos observados desde un enfoque técnico.

Finalmente, en la quinta y última parte, correspondiente al Capítulo 5, se presentan las conclusiones generales del trabajo, junto con una reflexión sobre las posibles líneas de investigación futura, tanto en proyectos de características similares como en el desarrollo de tecnologías aplicadas al ámbito de la defensa.

2 ESTADO DEL ARTE

En este apartado se van a explicar con detalle los antecedentes de los radares, introduciendo los radares activos y pasivos, haciendo especial hincapié en los activos para más adelante explayarse tanto en los pulsados como en los de onda continua, centrándose especialmente en los pulsados que son el tópico de este trabajo, así como su significación y utilidad en el presente tanto en el ámbito civil como en el militar. Para poder llevar a cabo este capítulo es necesario dejar constancia de los trabajos previos en los que se ha apoyado este documento para llegar a lograr los objetivos perseguidos. Es por ello que a continuación se mencionarán todos aquellos estudios que comenzaron con la investigación y desarrollo de los radares y que contribuyeron de diferentes formas a la posterior confección del mismo.

Asimismo, de la misma manera serán explicados todos los conceptos esenciales para el buen desarrollo y comprensión del trabajo, con el propósito de que el estudio realizado llegue a ser entendido con facilidad por el máximo número de lectores sin ser necesario un conocimiento previo extenso sobre la materia a tratar.

2.1 Invención del radar

2.1.1 Contribución a la invención del radar

El radar es una tecnología fundamentada en las leyes del electromagnetismo y las ondas de radio, como se explicará con mayor profundidad más adelante. Su desarrollo fue posible gracias a los avances tanto científicos como físicos que exploraron estos principios, realizaron descubrimientos y establecieron leyes fundamentales. Sin estos conocimientos, la creación de este dispositivo, que ha transformado el mundo contemporáneo, no habría sido posible.

Al igual que el cuerpo humano utiliza los sentidos para percibir el medio que lo rodea, esta necesidad de detectar con anterioridad sucesos u objetos comenzó a surgir hace muchos años en el ámbito militar.

Los fundamentos físicos del radar se remontan al siglo XIX con el desarrollo de la teoría electromagnética de James Clerk Maxwell, matemático y científico escocés inspirado por los descubrimientos sobre la inducción electromagnética de Michael Faraday. Este, tras un largo periodo de investigación, logró relacionar la influencia de los campos eléctricos con los campos magnéticos, dando lugar a las Ecuaciones de Maxwell: Conjunto de cuatro leyes donde se abordan conceptos fundamentales como el flujo eléctrico y el flujo magnético, así como la variación de este último y su vínculo con la corriente eléctrica inducida. Del mismo modo, se analiza cómo las variaciones en los campos eléctricos dan lugar a la generación de campos magnéticos, estableciendo así los principios fundamentales del electromagnetismo. [1]

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (2 - 1)$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial E}{\partial t}$$

$$\nabla \times E = \mu J + \mu \epsilon \frac{\partial E}{\partial t}$$

Posteriormente en 1887, el físico alemán Heinrich Rudolf Hertz tomando como base los descubrimientos de James Maxwell y Michael Faraday, logró demostrar la propagación de las ondas electromagnéticas en el espacio. En el experimento se hizo empleo únicamente de hilos metálicos curvados en forma de anillo manteniendo una distancia milimétrica entre ambos extremos, un transmisor y un receptor. Con esto, logró que en el momento en el que uno de los anillos, adecuadamente orientado, se utilizaba como receptor, este recibía un gran número de ondas electromagnéticas, cuyas variaciones de campo magnético generaban en el anillo corrientes inducidas de muy alta frecuencia, saltando chispas entre los extremos del mismo anillo. [2]

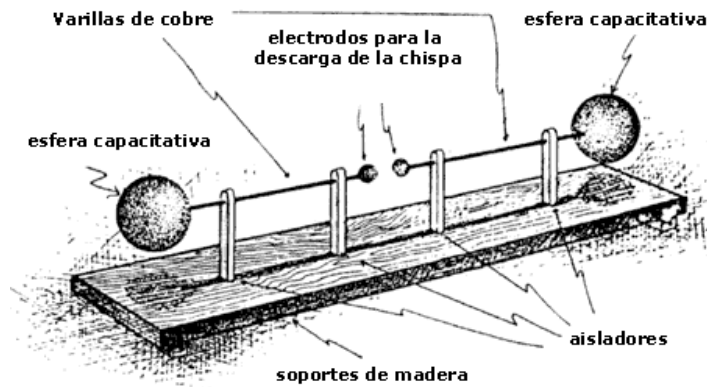


Figura 2-1 Experimento de Hertz [3].

En 1895, un año después de la muerte de Heinrich Rudolf Hertz, el joven físico italiano Guglielmo Marconi recopiló toda la información necesaria sobre la teoría electromagnética de Maxwell y experimentos de Hertz y consiguió establecer la primera transmisión de telegrafía sin hilos, ejecutando su primera transmisión de voz a través de mar abierto a una distancia de seis kilómetros [4]. Fue entonces cuando al fin, se lograban materializar las ecuaciones de Maxwell y experimentos de Hertz dándoles un uso práctico, que más adelante jugaría un importante papel en rescates marítimos como en el del Titanic y el de Lusitania [5].

Fue posteriormente a comienzos del siglo XX cuando se realizó el primer experimento verdaderamente trascendental desde el punto de vista de la demostración práctica del principio de un radar. En 1904, el ingeniero alemán Christian Hülsmeier, logró diseñar un aparato capaz de medir el tiempo que las ondas electromagnéticas emitidas por el propio barco tardaban en ir y regresar al emisor tras reflejarse en la superficie metálica de un barco y de esta forma calcular la distancia a la que se encontraba. Este recibió el nombre de Telemobiloscopio y su función era detectar la presencia de barcos y evitar colisiones en la niebla. Aunque su invento no tuvo una aplicación masiva en la época, sentó las bases para el desarrollo posterior del radar. [6]



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

Siendo “R” la distancia en metros a la que se encuentra el cuerpo u objeto radiado por la señal electromagnética, “c” la velocidad de la luz que tiene el valor de 3×10^8 metros/segundo (suponiendo que el medio de propagación es el vacío) y “t” el tiempo en segundos que tarda la señal en volver a la antena desde que es emitida.

Con respecto a entender de forma correcta el funcionamiento de un radar, es necesario conocer todos los conceptos que lo engloban. Se ha mencionado que el funcionamiento de este dispositivo se basa en la propagación sobre un medio de una onda electromagnética que incide en un objeto y vuelve a la antena que lo transmite. Sin embargo, es necesario conocer previamente nociones básicas sobre las ondas electromagnéticas para lograr entender su importancia en el radar.

Una onda electromagnética está compuesta por diminutos paquetes de energía conocidos como fotones. La energía de cada fotón es proporcional a la frecuencia de la onda, de modo que, a mayor frecuencia, mayor será la cantidad de energía que transporta cada fotón. [9]

Las ondas electromagnéticas, como su nombre indica, surgen de la combinación de un campo eléctrico y magnético. Cada partícula genera un campo a su alrededor y la combinación de partículas oscilando a la vez generan radiaciones electromagnéticas que al mismo tiempo generan unas ondas, capaces de propagarse por el aire e incluso por el vacío. Esta perturbación depende de diferentes factores como la velocidad y la fuerza con la que movemos las partículas o la amplitud o distancia entre el inicio y el final del recorrido, además de la unidad de veces que se repite por unidad de tiempo. Es importante saber también que el campo eléctrico generado y el campo magnético siempre serán perpendiculares entre sí y a la dirección de la onda. [10]

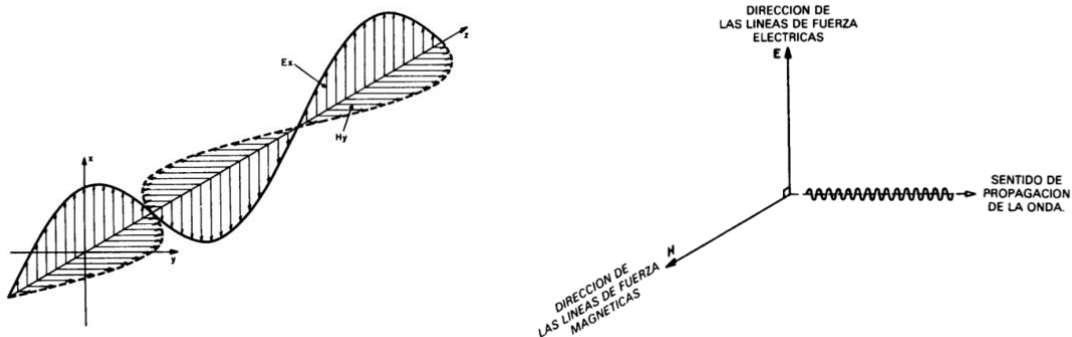


Figura 2-3 Onda electromagnética [11].

2.2.1 Propagación de las ondas electromagnéticas

Como se ha comentado anteriormente, la onda electromagnética es producida por la existencia de un campo eléctrico y otro magnético perpendiculares entre sí y variables en el tiempo, siendo la dirección de propagación de la onda perpendicular al plano formado por ambos campos como se aprecia en la figura 2-3 Onda electromagnética. Durante su trayectoria, habrá momentos en los que el campo eléctrico y magnético se anulen en ciertos momentos y en otros sean máximos. Surge entonces el plano que se denomina como frente de ondas cuando una onda se propaga por el espacio y los campos eléctrico y magnético se desplazan en sentido del eje z.

En primer lugar, una onda cuando se propaga en el vacío lo hace de forma ideal. Sin embargo, cuando esta se propaga por el aire sufre una serie de pérdidas denominadas atenuaciones, generando en la onda alteraciones debido a la creación de dispersiones, refracciones, reflexiones y absorciones.

La dispersión electromagnética es el fenómeno esencial en la física por el cual las ondas electromagnéticas son desviadas en varias direcciones al encontrarse con un obstáculo o partícula, siendo esta desviación el resultado de la interacción entre la onda y los átomos de la partícula. Además, parámetros como la velocidad y la longitud de onda se ven también modificados. [12]

Cuando una onda se propaga a través de un medio y alcanza una superficie que lo separa de otro, pueden producirse dos fenómenos: reflexión y refracción. En términos generales, una parte de la energía de la onda incidente se refleja en la superficie, mientras que otra parte atraviesa el límite y se refracta en el segundo medio como se parecía en las figuras 2-4 Onda refractada y 2-5 Onda reflejada. [13]

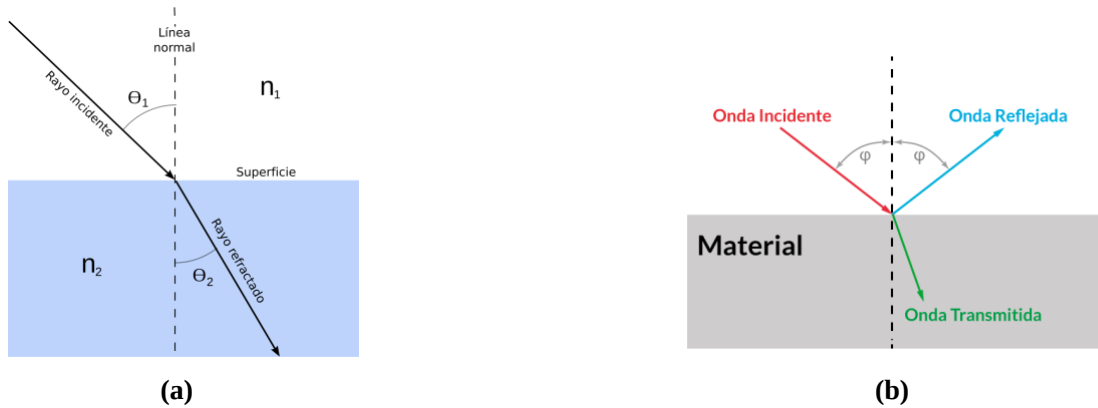


Figura 2-4 Onda refractada (a) [14]. Onda reflejada (b) [15].

El fenómeno de absorción ocurre cuando una onda atraviesa un material y transfiere parte de su energía a este, dependiendo de sus propiedades y la frecuencia de la onda. Como resultado, se produce una disminución de su amplitud. Este efecto representa una limitación significativa en los enlaces, ya que puede generar una pérdida considerable de energía. [16]

Cuando una onda se propaga por el vacío, la velocidad con lo que lo hace será:

$$v = c \quad (2 - 3)$$

En cambio, esta velocidad varía si el medio por el que se propaga la onda es el aire en vez del vacío, siendo la ecuación resultante:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} \quad (2 - 4)$$

Siendo “c” en ambos casos la velocidad de la luz que tiene el valor de 3×10^8 metros/segundo, “ ϵ ” la permitividad del material, siendo en el mayor de los casos aire obteniendo el valor de $8,854 \times 10^{12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ y “ μ ” la permeabilidad que en el caso del aire tiene el valor de $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$.

2.2.2 Interacción con los cuerpos

En este apartado se va a explicar el funcionamiento y resultado de una onda electromagnética cuando incide en un cuerpo u objeto. Para ello, es necesario entender previamente el concepto de la RCS (Radar Cross Section) o firma radar de un blanco, y cómo esta afecta a la hora de recibir los datos de un contacto.

La firma radar de un determinado objeto, nos indica la cantidad de energía que dicho objeto es capaz de reflejar cuando es iluminado por un radar. Este parámetro, depende de características propias del blanco (geometría del blanco, material del que está hecho) al igual que de las peculiaridades de la onda

que incide sobre él (siendo las más importantes la frecuencia/longitud de onda a la que opera el radar, ángulo de incidencia y polarización de la onda transmitida/recibida). [17]

Sin embargo, no toda la energía radiada por la antena transmisora incide en el blanco, y de toda la señal radar que incide, parte es absorbida por el blanco, parte es reflejada hacia el radar, otra parte se dispersa en otras direcciones y otra es difractada, siendo realmente la firma radar un producto de tres factores:

$$RCS = \text{Sección proyectada} \times \text{Reflectividad} \times \text{Directividad} [m^2]$$

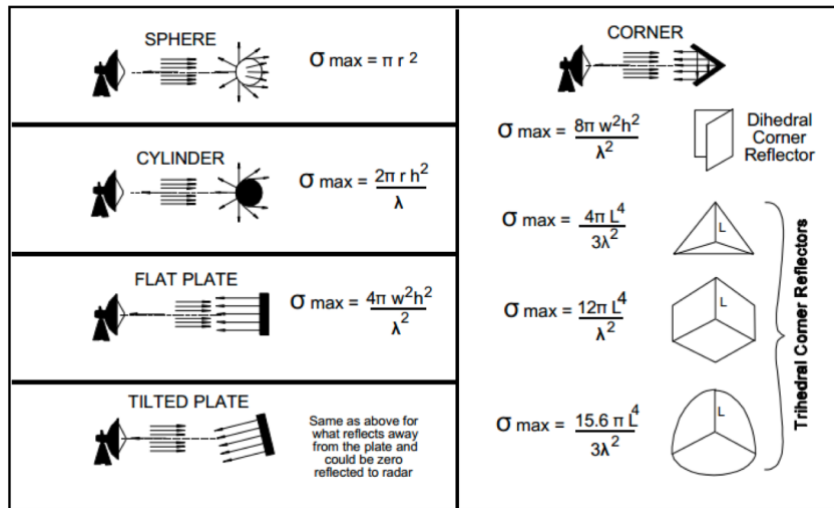


Figura 2-5 RCS de un blanco dependiendo de su geometría

En términos generales, la geometría del objeto tiene un impacto significativo en su RCS. Las superficies lisas y aerodinámicas tienden a dispersar la energía incidente, minimizando la intensidad de la señal reflejada en dirección a la antena receptora. Por el contrario, estructuras con múltiples aristas y discontinuidades geométricas generan una mayor dispersión de las ondas electromagnéticas, incrementando la probabilidad de que una fracción significativa de la señal vuelva hacia el radar.

Además, las propiedades electromagnéticas del material que conforma el objeto desempeñan un papel determinante en la absorción y reflexión de la energía incidente. Superficies con alta capacidad de absorción reducen drásticamente la señal reflejada, lo que dificulta su detección. En contraste, materiales con alta reflectividad aumentan la retrodispersión de la onda incidente, favoreciendo la detectabilidad del blanco. [18]

Por otro lado, en sistemas radar que operan a frecuencias más elevadas, la RCS del blanco tiende a disminuir, debido a que la longitud de onda empleada se aproxima a la escala geométrica del objeto, favoreciendo fenómenos de dispersión y reducción de la retrodispersión coherente.

Es más, la orientación de la onda incidente respecto a la superficie del blanco es un factor determinante en la interacción electromagnética, ya que el ángulo de incidencia influye directamente en la distribución de la energía reflejada, refractada o absorbida, condicionando la detectabilidad del objetivo.

2.3 Componentes que conforman un radar pulsado

Hasta el momento, conocemos el funcionamiento del radar y qué parámetros de un blanco hacen que este sea localizado con mayor o menor facilidad. Ahora bien, para que un radar funcione correctamente es necesario que esté constituido por una serie de componentes sin los que tendría una

baja eficacia operativa o quedaría obsoleto. No obstante, en el siguiente apartado se van a describir los principales elementos que configuran un radar convencional.

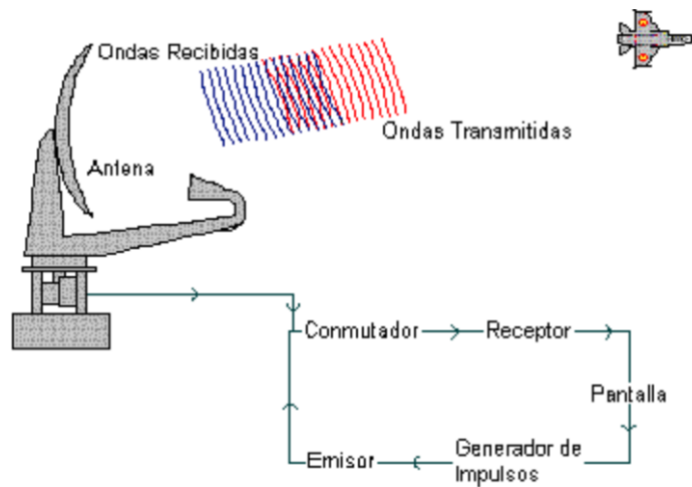


Figura 2-6 Componentes del RADAR pulsado [19].

2.3.1 Sincronizador

El sincronizador del radar es el encargado de generar y distribuir las referencias temporales necesarias para el funcionamiento coordinado del sistema. Este componente suministra las marcas de tiempo, los pulsos de disparo y las señales de control a los distintos subsistemas del radar, garantizando la sincronización precisa entre la transmisión y la recepción.

Además, el sincronizador establece el instante de inicio de la emisión de las ondas de radar, alineando la generación del pulso del transmisor con el resto de los procesos del sistema, lo que resulta fundamental para la correcta medición del tiempo de propagación y, por ende, para la determinación precisa de la distancia a los blancos detectados. [20]

2.3.2 Transmisor

La función que tiene el transmisor es la de generar los pulsos de radiofrecuencia de alta potencia para que la antena radie al espacio [21]. Este, debe emitir la suficiente energía en forma de onda electromagnética con el propósito de que, en etapas posteriores, el receptor y el procesador de señales puedan realizar la cuantificación de la retrodispersión y optimizar el procesamiento para la detección y localización precisa de los contactos.

El transmisor emite una señal, que puede ser de naturaleza continua o pulsada, en función de los requisitos operacionales del sistema. Una vez generada, el proceso de modulación entra en acción a través del modulador, un subsistema fundamental dentro del transmisor encargado de estructurar la señal para su correcta interpretación en etapas posteriores del procesamiento. [22]

Desde un punto de vista técnico, la modulación consiste en la superposición de información sobre una onda portadora sinusoidal mediante la alteración controlada de alguno de sus parámetros fundamentales. Entre las técnicas de modulación más empleadas en sistemas de radar y telecomunicaciones se encuentran la modulación en amplitud (AM), la modulación en frecuencia (FM) y la modulación en fase (PM), cada una de ellas con aplicaciones específicas en función de las características del entorno y del propósito de la transmisión.

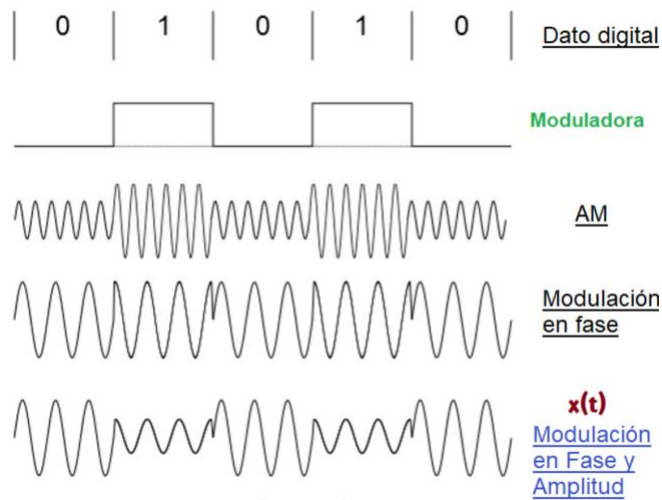


Figura 2-7 Modulaciones de una onda [22].

Una vez modulada la señal, esta se incorpora a una onda portadora de mayor frecuencia, lo que permite el desplazamiento de su contenido espectral hacia frecuencias más altas. Este proceso es útil ya que facilita la transmisión y recepción de la señal en sistemas de comunicación.

La combinación de la señal modulada con la portadora requiere una etapa de amplificación, esencial para incrementar su potencia hasta alcanzar los niveles de energía necesarios para su emisión como pulso. [23]

Previo a la transmisión a la antena, la señal puede ser sometida a un proceso de filtrado, destinado a eliminar componentes indeseados, o a una conversión de frecuencia para ajustarla a los parámetros requeridos del sistema. Estas modificaciones se llevan a cabo mediante un mezclador o un convertidor de frecuencia, dispositivos diseñados para adaptar la señal a la banda de operación óptima.

Una vez se emite la señal, es necesaria la separación entre la vía de transmisión y la de recepción. Esta tarea es realizada por un conmutador de transmisión y recepción o duplexor. Durante la fase de transmisión, habilita el paso del pulso hacia la antena, aislando simultáneamente el receptor para evitar que la alta potencia de la señal transmitida lo sature o dañe, dado su alto nivel de sensibilidad.

Posteriormente, en la fase de recepción, el duplexor conmuta la conexión de la antena al receptor, permitiendo que los ecos reflejados sean captados y procesados con la mínima atenuación posible, optimizando así la eficiencia en la detección y el análisis de las señales reflejadas. [24]

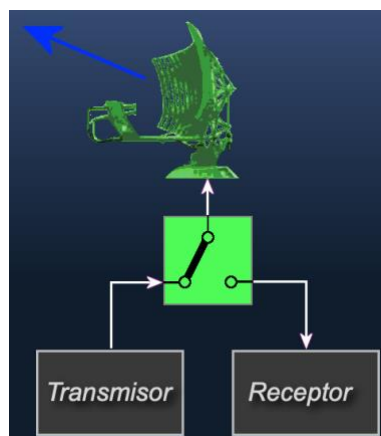


Figura 2-8 Tarea del duplexor en el sistema RADAR

2.3.3 Receptor

El receptor del radar lleva a cabo la conversión de las señales de alta frecuencia a una frecuencia intermedia (FI), optimizando su procesamiento y filtrado. En esta etapa, se extrae exclusivamente la componente espectral que contiene la información relevante del eco reflejado, eliminando señales indeseadas y ruido de fondo. Sin embargo, no siempre es posible recopilar toda la información y parte se pierde.

Para maximizar el rango dinámico y mejorar la sensibilidad del sistema, se emplean predominantemente amplificadores logarítmicos, los cuales permiten una respuesta más eficiente ante variaciones significativas en la amplitud de la señal, garantizando una mejor adaptación a las fluctuaciones de potencia del eco recibido. [24]

2.3.4 Procesador de señales

El procesador de señales del radar ejecuta el procesamiento en tiempo real de los ecos reflejados, permitiendo la extracción y análisis de la información contenida en las señales recibidas. En esta etapa, los ecos pueden ser digitalizados, manteniendo siempre una correlación temporal fija con el pulso transmitido, lo que es fundamental para la correcta determinación de la distancia y la velocidad del blanco.

Para llevar a cabo el procesamiento de las señales recibidas, es fundamental emplear un procesador digital de señales (Digital Signal Processor, DSP). Estos dispositivos están diseñados para manejar grandes volúmenes de datos y ejecutar cálculos matemáticos de manera altamente eficiente, gracias a su arquitectura optimizada y su capacidad de procesamiento en tiempo real.

La relación señal-ruido (SNR) mide la proporción entre la potencia de la señal transmitida y el ruido presente, determinando el umbral de degradación aceptable para su correcta interpretación por el radar. Se expresa en decibelios (dB) en una escala logarítmica. Para optimizar este parámetro, se emplea un conjunto de filtros que mejoran la calidad de la señal haciéndola más clara y precisa ofreciendo así mejor resultado. Dado que el tipo de filtro aplicado influye directamente en la identificación y caracterización del objetivo, su referencia debe ser transmitida junto con la señal procesada para su uso en etapas posteriores de análisis e interpretación. [20]

2.3.5 Parámetros de las antenas

La antena es un componente diseñado para radiar energía electromagnética eficientemente y fundamental del radar, ya que determina múltiples características del sistema. Está formada por un conjunto de conductores pegados a ella, bien conectados o no a la antena, que se comportarán como planos a tierra [25]. Estos, al conectarse a una fuente de energía, emiten ondas electromagnéticas, funcionando como antena transmisora. En cambio, si están conectados a una impedancia, captan señales electromagnéticas y actúan como antena receptora, transformando la señal en una onda eléctrica.

Teniendo en cuenta el concepto de radar y todas las características que influyen a la hora de que un blanco sea detectado o no, es de vital importancia a su vez saber cómo la configuración de un radar altera de forma significativa las funciones del mismo. A día de hoy existen diversos tipos de radares dependiendo de la función que desempeñen y esto se ve en gran parte reflejado en la variación de los parámetros que tiene la antena.

Los parámetros operativos de un radar se ajustan en función de los requisitos específicos de cada aplicación. Sin embargo, dicha optimización no es un proceso trivial, ya que la modificación de un parámetro destinado a mejorar un determinado rendimiento puede comprometer el desempeño de otros aspectos del sistema. Por esta razón, es fundamental comprender en profundidad las características intrínsecas del radar y la interdependencia de sus variables, con el fin de evaluar su impacto global en el desempeño y la precisión de detección.

2.3.6 Parámetros del movimiento ondulatorio

Una onda es una perturbación que se propaga a través de un determinado medio o en el vacío, con transporte de energía, pero sin transporte de materia.

La descripción de estos movimientos se realiza mediante una ecuación de onda que determina cuál es el estado de perturbación de cada uno de los puntos situados en la dirección de propagación (x) en un instante cualquiera (t).

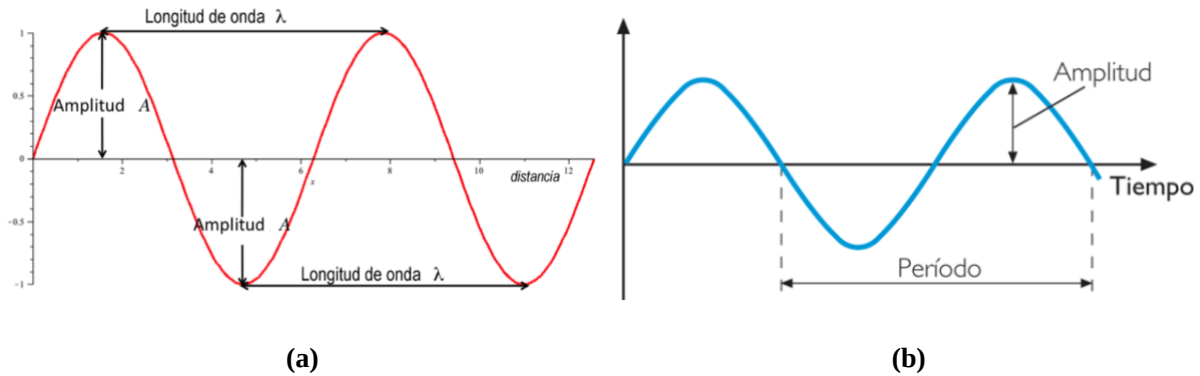


Figura 2-9 Parámetros de una onda. Eje de distancia (a). Eje de tiempo (b)

Como se puede apreciar en las figura 2-9, los parámetros característicos de un movimiento ondulatorio son:

- **Amplitud (A)** : Este parámetro nos indica la máxima distancia de cualquier punto de la onda medida respecto a su punto de equilibrio. Se expresa en unidades de longitud [m]. Los puntos donde la onda alcanza sus amplitudes máximas se donominan cresta y valle, siendo estos los superiores e inferiores respectivamente.
- **Longitud de onda (λ)** : Al igual que la amplitud, se expresa en unidades de longitud [m]. En cambio, este parámetro marca la distancia que existe entre dos puntos sucesivos que se encuentran en el mismo estado de vibración (misma elongación, velocidad y aceleración).
- **Período (T)** : Nos indica el tiempo necesario para describir una oscilación completa o el tiempo que emplea la onda para recorrer su longitud de onda. A diferencia de los dos parámetros anteriores, este se expresa en unidades de tiempo [s].
- **Frecuencia (f)** : Es el número de oscilaciones por unidad de tiempo y su unidad es el s^{-1} o hercio [Hz]. Es la característica principal y responsable de muchos factores de la onda y su valor es inversamente proporcional al período.

$$T = \frac{1}{f} \quad (2 - 5)$$

Este parámetro guarda estrecha relación con el ancho de banda, que se define como el intervalo de frecuencias en el que sus parámetros electromagnéticos cumplen con los estándares de rendimiento establecidos. Este rango de operación se extiende a ambos lados de la frecuencia central, dentro del cual las características de la antena permanecen dentro de los límites aceptables al compararse con los valores de referencia de la frecuencia central. [26]

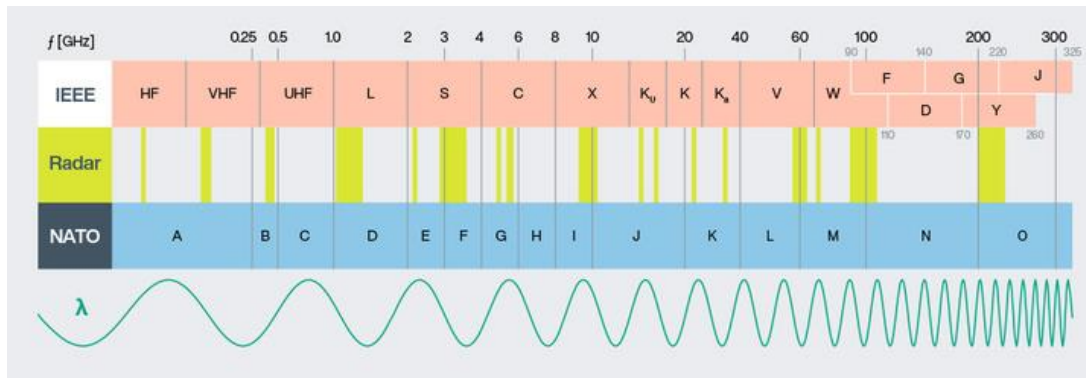


Figura 2-10 Bandas de frecuencia IEEE/ RADAR/ OTAN

La figura 2-10, muestra la distribución de los anchos de banda en función de la frecuencia y la longitud de onda, de acuerdo con las clasificaciones establecidas por la IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) y la OTAN (Organización del Tratado del Atlántico Norte). La primera categorización corresponde al ámbito civil, mientras que la clasificación de la OTAN se aplica al sector militar.

- **Fase de la onda (ϕ_0)** : Se entiende por fase de la onda el estado de vibración de un punto de la onda. Proporciona una medida cuantitativa de la oscilación de la onda en un punto específico del espacio, determinando su posición exacta en un instante determinado. Esta magnitud se expresa en radianes [rad] o grados [°].
- **Número de onda (k)** : Se define como la cantidad de longitudes de onda o ciclos completos presentes en un intervalo de 2π metros. En el Sistema Internacional de Unidades (SI), su magnitud se expresa en [m^{-1}]. Su formulación matemática se expresa como:

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad (2 - 6)$$

- **Velocidad de propagación (v)** : También conocida como velocidad de fase, se puede entender como el desplazamiento que realiza una onda por unidad de tiempo, o como la rapidez a la que se propaga una onda. Su unidad en el SI es [$m \cdot s^{-1}$] y viene dada por la siguiente expresión:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f \quad (2 - 7)$$

Teniendo en cuenta todos los parámetros mencionados anteriormente, se podrá determinar la ecuación de una onda, siendo su expresión:

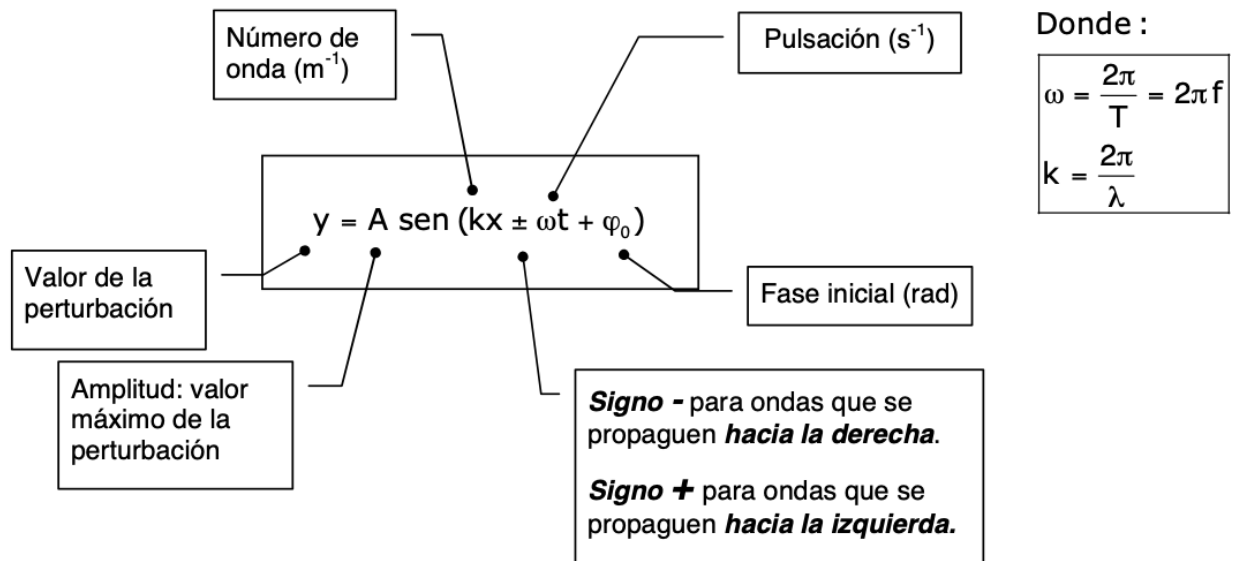


Figura 2-11 Ecuación de una onda [27].

2.3.7 PRF/PRI

La frecuencia de repetición de pulsos o PRF (*Pulse Repetition Frequency*) es el número de pulsos transmitidos en un segundo y su magnitud se expresa en hercios [Hz].

Por otro lado, el intervalo de repetición de pulsos o PRI (*Pulse Repetition Interval*) es el tiempo que transcurre entre la emisión de un pulso al siguiente. Es inversamente proporcional al PRF siendo su magnitud expresada en segundos [s].

Ambos parámetros son característicos de los radares pulsados, donde se produce una transmisión durante un intervalo de tiempo determinado por el ancho de pulso y posteriormente durante el intervalo de repetición de pulsos se recibe la información sobre el blanco u objeto. Por lo que en un radar pulsado o se está transmitiendo o se está recibiendo, pero nunca se podrán procesar ambas acciones de forma simultánea. En cambio, en los radares de onda continua se transmite de forma constante por lo que no se dará lugar a la aparición de estos parámetros.

La variación de la frecuencia de repetición de pulsos (PRF) constituye un factor de gran relevancia en el funcionamiento de los radares pulsados, ya que influye directamente en su rendimiento operativo en función del propósito para el cual han sido diseñados. Un incremento en la PRF permite al radar emitir un mayor número de pulsos por segundo, lo que incrementa la capacidad de detección de velocidades elevadas y mejora tanto la resolución temporal como la tasa de actualización de la información. Estas características resultan especialmente ventajosas en sistemas de radar orientados al seguimiento y detección de blancos móviles de alta velocidad.

Por el contrario, una reducción de la PRF puede ser también beneficiosa en ciertos contextos, ya que conlleva un aumento del alcance máximo no ambiguo del radar, permitiendo detectar blancos a distancias mayores sin confusión en la medición del rango. Además, esta disminución contribuye a una mayor precisión en la estimación del alcance del blanco, al minimizar las ambigüedades asociadas a la recepción de los ecos. [28]

2.3.8 Diagrama de radiación

El diagrama de radiación de una antena se refiere a la intensidad radiada en cada dirección por dicha antena. Esta intensidad es siempre relativa a la intensidad emitida en el lóbulo principal que está situado centralmente alrededor del ángulo 0, que se considera el ángulo de visión. También representa la sensibilidad de recepción direccional de la antena.

El uso de los diagramas de radiación facilita la determinación de parámetros clave en el análisis del rendimiento de una antena. Entre ellos, la relación de lóbulo principal a secundario (SLL, Side Lobe Level), definida como la razón entre la potencia radiada en el lóbulo principal y la potencia del lóbulo secundario de mayor intensidad. [29]

Asimismo, permite calcular la relación delante-detrás (F/B, Front-to-Back Ratio), que corresponde al cociente entre la potencia del lóbulo principal y la potencia del lóbulo ubicado a 180° respecto a este, proporcionando una medida de la directividad y la eficiencia de la antena en la reducción de interferencias en la dirección opuesta a la radiación principal.

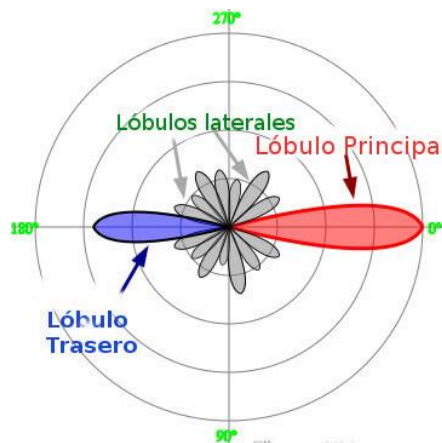


Figura 2-12 Diagrama de radiación de una antena en coordenadas polares [30].

2.3.9 Ancho de haz

El ancho del haz del lóbulo principal de una antena se define como la anchura angular de la curva de potencia en la que la intensidad disminuye hasta la mitad de su valor máximo. [31]

El pico de la curva de potencia se determina mediante mediciones en un entorno con mínimas reflexiones, tomándose este valor como referencia para la representación del patrón de radiación de la antena en función del ángulo de giro. A medida que se aleja del máximo del lóbulo principal, la potencia medida decrece gradualmente.

El ancho del haz se establece como el ángulo entre los puntos situados a la izquierda y derecha del máximo donde la potencia cae al 50 % de su valor máximo, lo que en escala logarítmica equivale a -3 decibelios [dB].

2.3.10 Potencias de trabajo

En el contexto de los radares y las ondas electromagnéticas, la potencia se define como la cantidad de energía radiada por unidad de tiempo. En los radares de navegación y exploración, que operan con onda pulsada, la transmisión no es continua, sino que se emiten pulsos de radiación seguidos de intervalos sin emisión. El ancho de pulso (τ) representa la duración de cada pulso transmitido.

La potencia de pulso es la energía radiada durante un solo pulso, mientras que la potencia media se calcula considerando la energía total emitida en un período de tiempo determinado, denominado ciclo de trabajo, el cual depende de la tasa de repetición de pulsos (PRF) y el ancho de pulso. [32]

La potencia de pico es un parámetro clave en la determinación del alcance del radar, ya que una mayor potencia de pico permite compensar las pérdidas por propagación y mantener una relación señal-ruido (SNR) adecuada en el receptor.



Figura 2-13 Potencia media, potencia de pico, ciclo de trabajo

La relación de potencia, definida como el cociente entre la potencia recibida y el ruido del receptor, debe superar un umbral mínimo para garantizar la correcta demodulación e interpretación de la señal. Además, la potencia influye directamente en la sensibilidad del radar, es decir, el nivel mínimo de energía que debe alcanzar el receptor para identificar y procesar una señal de manera efectiva.

2.3.11 Ganancia

La ganancia de antena es un parámetro que cuantifica la capacidad de una antena para concentrar y dirigir la radiación electromagnética en una dirección específica, optimizando la eficiencia en la transmisión y recepción de señales. Se expresa en decibelios respecto a una antena isotrópica [dBi] o a un dipolo [dBd].

Una mayor ganancia implica una mayor directividad, lo que se traduce en una mayor distancia de transmisión y una mejor relación señal-ruido (SNR), incrementando así la calidad de la señal recibida en el sistema.

2.4 Efecto Doppler

El efecto Doppler fue descrito por primera vez en 1842 por el físico austríaco Christian Andreas Doppler, quien postuló que la frecuencia de una onda observada por un receptor varía en función del movimiento relativo entre la fuente emisora y el observador. Inicialmente, esta hipótesis fue propuesta para explicar los cambios de tono en las ondas sonoras emitidas por fuentes en movimiento, como por ejemplo el sonido de un tren al aproximarse o alejarse. Posteriormente, su validez fue confirmada experimentalmente y se extendió a otros tipos de ondas, incluyendo las ondas electromagnéticas, lo cual sentó las bases para su aplicación en el ámbito de los sistemas radar.

2.4.1 Naturaleza del efecto Doppler

El efecto Doppler consiste en la variación aparente de la frecuencia de una onda cuando existe movimiento relativo entre el emisor y el receptor de dicha señal. Si la fuente emisora se aproxima al observador, la frecuencia percibida será mayor que la original; en cambio, si la fuente se aleja, la frecuencia recibida será menor. Esta variación está directamente relacionada con la velocidad relativa entre ambas partes y la dirección de su movimiento. Matemáticamente, el desplazamiento de frecuencia (f_d) se expresa como:

$$f_d = \frac{2 \cdot v_{LOS}}{\lambda} = \frac{2 \cdot (v_r - v_b)}{\lambda} \quad (2 - 8)$$

donde v_{LOS} es la velocidad radial relativa entre el blanco y el radar, siendo v_r la velocidad del radar y v_b la velocidad del blanco, y λ es la longitud de onda de la señal emitida.

2.4.2 Efecto Doppler en radar pulsado

En el contexto de un radar pulsado, el efecto Doppler se manifiesta como un desplazamiento en la frecuencia de la señal reflejada por un blanco en movimiento con respecto a la frecuencia de la señal transmitida. Este desplazamiento es una consecuencia del movimiento radial del blanco (ya sea de acercamiento o alejamiento) y proporciona una estimación directa de su velocidad relativa. A diferencia de los radares de onda continua, donde la detección Doppler es continua y más directa, en los radares pulsados la medición del efecto Doppler requiere el análisis coherente de múltiples ecos consecutivos, lo que implica la utilización de técnicas como la Transformada de Fourier para obtener una representación espectral de la señal recibida.

El aprovechamiento del efecto Doppler en radares pulsados es fundamental para la identificación y seguimiento de blancos móviles, ya que permite no solo determinar su presencia, sino también estimar su velocidad, contribuyendo significativamente a la capacidad de discriminación e interpretación del entorno radar.

2.5 Ventajas del radar pulsado

El radar es una tecnología fundamental en la detección y localización de objetos, ofreciendo ventajas clave como su capacidad de operar en diversas condiciones meteorológicas y en entornos de baja visibilidad. Su precisión en la medición de distancias y velocidades, junto con su capacidad de seguimiento en tiempo real, lo convierte en una herramienta indispensable en aplicaciones militares, aeronáuticas, marítimas y de control del tráfico.

2.5.1 Ventajas generales

Desde el punto de vista de la eficiencia energética, los radares pulsados emiten señales de alta potencia en intervalos breves, lo que permite reducir el consumo energético en comparación con los radares de onda continua. Esto se debe a que la emisión no es constante, sino intermitente, optimizando el uso de energía y permitiendo su implementación en plataformas con capacidad energética limitada, como aeronaves y vehículos autónomos. [33]

Por otro lado, ofrecen mayor alcance con potencia moderada al concentrar la energía en pulsos de corta duración, por lo que logran detectar objetos a grandes distancias sin necesidad de una emisión continua. La potencia de pico del pulso determina el alcance máximo de detección, permitiendo que los radares pulsados superen en distancia a muchos sistemas de radar de onda continua, especialmente en aplicaciones de vigilancia y alerta temprana.

También proporcionan menor interferencia y mejor separación de objetivos dado que la transmisión y la recepción ocurren en momentos distintos. Es por ello que se reduce significativamente la posibilidad de interferirse a sí mismo. Además, la capacidad de modular la frecuencia y la duración del pulso permite mejorar la resolución en distancia, facilitando la discriminación entre blancos cercanos. [34]

Además, su adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales permite que los radares pulsados puedan ajustarse para operar en distintos entornos, incluyendo condiciones meteorológicas adversas como lluvia, nieve o niebla, donde otros sistemas pueden presentar limitaciones en la propagación de la señal. Su diseño también permite la incorporación de filtros y algoritmos de procesamiento de señal para minimizar el impacto de ecos indeseados y reflejos provenientes del terreno o del mar.

Finalmente, su compatibilidad con los modos avanzados de procesamiento de señal, como por ejemplo el uso de técnicas de compresión de pulso, el filtrado Doppler y el procesamiento adaptativo, mejoran la precisión del radar pulsado, permitiendo identificar blancos en movimiento y reducir la interferencia del ruido de fondo. Estas técnicas aumentan la eficacia en la detección y seguimiento, especialmente en escenarios complejos con múltiples objetivos.

2.5.2 Ventajas en el ámbito militar

Los radares pulsados tienen un papel crucial en la defensa y la seguridad, proporcionando capacidades avanzadas para la detección, seguimiento y neutralización de amenazas potenciales.

Su capacidad de alerta temprana y vigilancia estratégica, donde los radares pulsados de larga distancia, como los de baja frecuencia (VHF/UHF), permiten detectar aeronaves, misiles balísticos y otros blancos a gran distancia. Su capacidad para operar en frecuencias que penetran contramedidas electrónicas y minimizan la detección por radares enemigos los hace esenciales para sistemas de alerta temprana.

A su vez, mejora en la discriminación de objetivos en escenarios de combate, dado a que la capacidad de un radar pulsado para identificar y separar objetivos múltiples es fundamental. Su alta resolución en distancia permite diferenciar entre aviones enemigos, misiles entrantes y aeronaves aliadas, facilitando la toma de decisiones estratégicas [33].

Cabe añadir que su compatibilidad con sistemas de defensa antimisiles, hace que los radares pulsados sean esenciales para sistemas de defensa aérea y antimisiles, ya que pueden rastrear objetos en movimiento rápido y predecir su trayectoria. Al incorporar procesamiento Doppler, pueden distinguir blancos en movimiento de ecos fijos, lo que es clave para interceptar amenazas con precisión.

Además, su reducción del riesgo de detección mediante el uso de técnicas como la dispersión de pulsos y la variabilidad en la frecuencia de transmisión permite que los radares pulsados militares sean menos detectables por sistemas de guerra electrónica enemigos. Esta capacidad mejora la supervivencia en entornos hostiles, reduciendo la probabilidad de ser localizados y neutralizados. [35]

Para finalizar, su aplicación en sistemas de radar móvil es una gran ventaja ya que muchos radares pulsados están diseñados para operar en plataformas móviles, como aeronaves, vehículos terrestres y buques de guerra. Su capacidad para transmitir y recibir señales de alta precisión sin requerir un flujo constante de energía los hace ideales para unidades militares en movimiento, optimizando la capacidad de respuesta en combate.

3 DESARROLLO DEL TFG

En este capítulo se describe el proceso llevado a cabo en la realización del trabajo de Fin de Grado, donde se explicará paso a paso con ayuda del sistema de cómputo numérico Matlab, dependiendo de los datos del blanco y del radar, cómo obtenemos la información y qué parámetros del radar se deben modificar para obtener la mayor cantidad de datos posibles sobre los blancos a detectar.

Para ello, mediante el lenguaje de programación, se creará una interfaz interactiva que el usuario podrá modificar y experimentar con ella obteniendo diferentes datos gráficos de frecuencia-tiempo a medida que modifique sus parámetros.

3.1 Secuencia a seguir

En este apartado se van a explicar los diferentes códigos de programación empleados durante el desarrollo del proyecto.

El análisis espectral de blancos móviles en un radar pulsado es un área fundamental en el procesamiento de señales de radar, permitiendo la caracterización de objetivos en términos de su contenido frecuencial. A lo largo de este trabajo, se desarrollará un radar pulsado mediante programación en MATLAB, con el objetivo de analizar el comportamiento espectral de blancos móviles.

Uno de los principales enfoques será la representación del espectro en frecuencia de los blancos, lo que permitirá identificar y diferenciar blancos en movimiento de aquellos que permanecen estáticos. Para ello, se empleará la Transformada de Fourier, una herramienta esencial en el procesamiento de señales que permite la conversión del dominio temporal al dominio frecuencial. La aplicación de la Transformada de Fourier posibilitará la obtención del espectro Doppler del blanco, proporcionando información clave sobre su velocidad.

Asimismo, se realizará el estudio del teorema de Nyquist, el cual establece la tasa mínima de muestreo necesaria para evitar el solapamiento de espectros en el dominio de la frecuencia. Este principio es clave en la determinación de la resolución y capacidad del radar para detectar correctamente la velocidad de un blanco sin ambigüedades.

Posteriormente, se abordará el concepto de velocidad máxima no ambigua, una limitación inherente a los sistemas de radar pulsado, la cual depende del intervalo de repetición de pulso. Este análisis será fundamental para comprender el efecto del desdoblamiento espectral y su relación con la tasa de muestreo de los ecos de radar.

A través de la implementación en MATLAB, se desarrollarán simulaciones que permitirán validar los conceptos teóricos y evaluar el rendimiento del radar pulsado en diferentes escenarios. Este enfoque computacional facilitará la experimentación con distintos parámetros y la optimización del sistema para mejorar la detección y caracterización espectral de los blancos.

Una vez se hayan establecido y analizado en detalle los conceptos previamente mencionados, se procederá al desarrollo de un enfoque metodológico para el análisis del espectro radar de un blanco. Este análisis se llevará a cabo mediante la aplicación de la Transformada de Fourier en tiempo discreto. Adicionalmente, se empleará el concepto de la función delta de Dirac en el contexto del procesamiento de señales en tiempo discreto, lo que facilitará la representación y manipulación matemática de la señal muestreada, asegurando una caracterización precisa del comportamiento espectral del blanco en el dominio de la frecuencia.

Dicho enfoque garantiza que la adquisición de datos se realice de manera prácticamente continua, aunque manteniéndose dentro de un esquema discretizado que optimiza la eficiencia computacional y la gestión de los recursos del sistema. De este modo, se establece una metodología que posibilita el procesamiento digital de la señal sin comprometer la integridad de la información original.

Finalmente, se desarrollará una interfaz interactiva que permitirá al operador simular el comportamiento de un radar pulsado. A través de esta plataforma, será posible modificar diversos parámetros tanto del sistema radar como del blanco objetivo, con el fin de analizar en tiempo real la variabilidad de los datos recibidos.

Esta herramienta proporcionará una visualización detallada de cómo los cambios en los parámetros afectan la detección y el procesamiento de la señal, permitiendo evaluar la aparición de posibles ambigüedades en la interpretación de la información. De este modo, se facilitará el estudio y comprensión de los efectos asociados a la configuración del radar y la dinámica del blanco, contribuyendo a una mejor optimización del sistema y su desempeño en entornos operacionales.

3.2 Fundamentos matemáticos

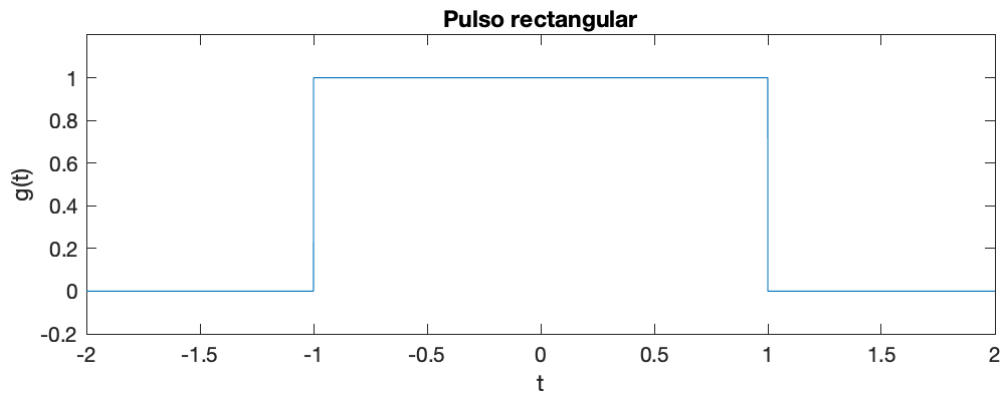
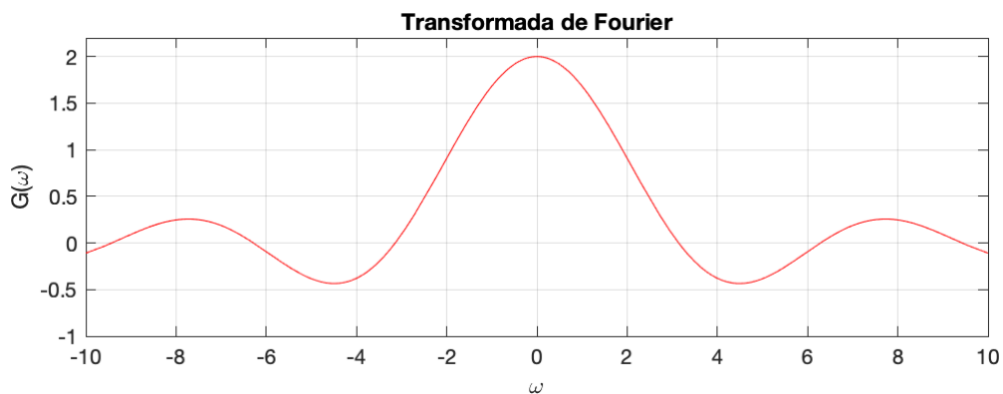
En este apartado se explicarán los conceptos fundamentales del análisis de señales radar, incluyendo el espectro radar de un blanco, la Transformada de Fourier, la velocidad máxima no ambigua y el Teorema de Nyquist.

Para facilitar su comprensión, se emplearán representaciones gráficas generadas mediante simulaciones en Matlab, que permitirán visualizar el comportamiento espectral de la señal y los efectos del muestreo en su reconstrucción. Se analizará cómo la frecuencia de muestreo influye en la calidad de los datos recibidos y cómo la ambigüedad en la velocidad puede afectar la interpretación de los blancos en movimiento.

3.2.1 Transformada de Fourier

La Transformada de Fourier es una herramienta matemática que toma una señal en el tiempo y la representa como la suma de muchas ondas sinusoidales, calculando la amplitud y fase de cada onda seno y coseno necesarias para reconstruir la señal original. Posteriormente, devuelve la señal en forma de espectro de frecuencias, mostrándose así cómo de fuerte es la señal. [36]

Suponiendo que la señal emitida por el radar pulsado es una onda rectangular como se puede apreciar en la figura 3-1, realizando la Transformada de Fourier se obtendría la señal reflejada en la figura 3-2. [37]

**Figura 3-1 Pulso rectangular****Figura 3-2 Transformada de Fourier**

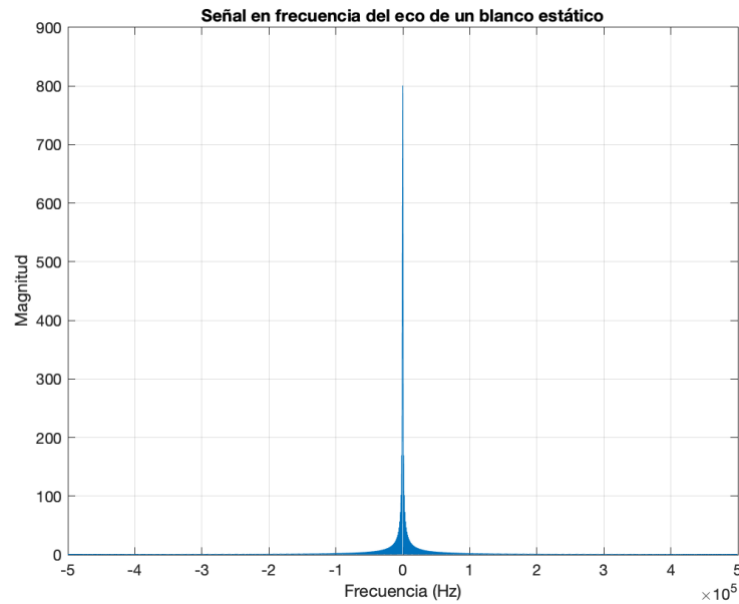
Transformar la señal al dominio de frecuencia es el primero de los pasos necesarios para poder analizar la onda recibida. A continuación, se realiza análisis de la cinemática del blanco a través del espectro radar que genera.

3.2.2 Espectro radar de un blanco

El espectro radar de un blanco se genera cuando la onda electromagnética transmitida por el radar se propaga a través de un medio determinado e interactúa con un objeto o blanco, produciendo un eco reflejado que es posteriormente recibido por el sistema radar. Una vez captada la señal de retorno, esta es procesada mediante técnicas de filtrado y transformación espectral, lo que permite su representación gráfica en el dominio de la frecuencia o del tiempo. Esta representación proporciona información clave sobre las características del blanco, facilitando su interpretación y análisis por parte del operador del radar.

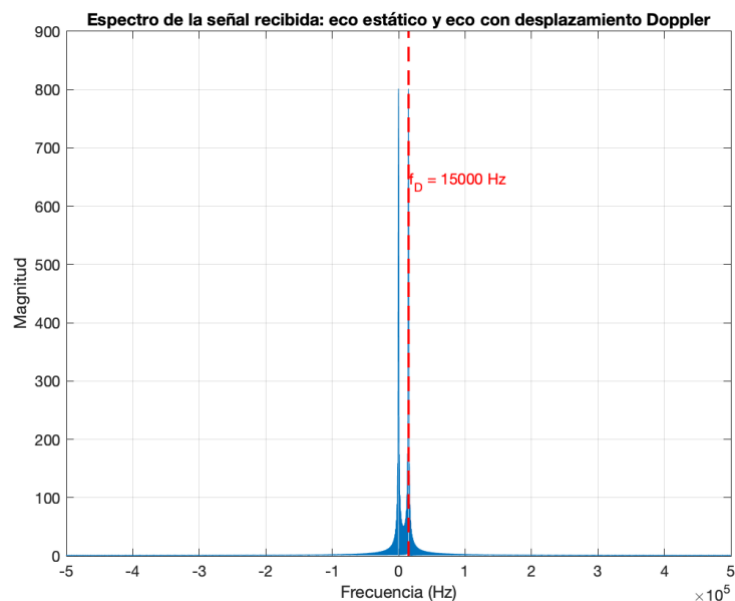
Sin embargo, hay muchos factores que influyen a la hora de interpretar estos gráficos, entre ellos, la cinemática del contacto.

Lo habitual a la hora de detectar un blanco es que este se encuentre en movimiento. No obstante, no siempre ocurre, dándose casos donde el objeto detectado se encuentra parado. Esto puede suceder y sucede en muchas ocasiones con barcos que se encuentran fondeados en las proximidades de un puerto, pequeños pesqueros o balizas. De tal forma que, en caso de detectar blancos estáticos, los gráficos obtenidos serían los mostrados en la Figura 3-3, donde no se observa ninguna onda desfasada con respecto a la estacionaria.

**Figura 3-3 Espectro radar de un blanco estático**

Por otro lado, cuando los objetivos se encuentran en movimiento, el análisis espectral revela variaciones significativas en comparación con el caso estático. En particular, se observa un desfase de frecuencia en la señal reflejada con respecto a la frecuencia de la señal emitida debido a la contribución de la frecuencia Doppler, la cual introduce una diferencia de fase entre el *clutter* estacionario (representado por la onda azul) y el blanco en movimiento (onda roja). La magnitud de esta separación está directamente relacionada con la frecuencia Doppler inducida por el movimiento relativo del blanco con respecto al radar.

Este desfase se manifestará desplazando la señal del blanco en movimiento hacia la derecha o la izquierda del espectro de la señal estacionaria, dependiendo de la dirección de la velocidad relativa del blanco respecto al radar. Si el blanco se aproxima al sistema radar, la frecuencia Doppler experimentará un corrimiento hacia valores más altos (desplazamiento hacia la derecha en el espectro), mientras que, si el blanco se aleja, el corrimiento será hacia frecuencias más bajas (desplazamiento hacia la izquierda). Estos efectos permiten la detección y caracterización de blancos móviles dentro del entorno de observación del radar.

**Figura 3-4 Espectro radar de un blanco en movimiento**

En cambio, la detección de un blanco en movimiento no garantiza necesariamente la obtención de información fiable. Este fenómeno ocurre cuando la velocidad del blanco detectado es igual o superior a la velocidad máxima no ambigua del sistema radar. En tales casos, se produce un fenómeno conocido como ambigüedad de velocidad, en el cual la frecuencia Doppler medida puede inducir errores en la estimación de la velocidad real del blanco, afectando la interpretación de los datos y la correcta identificación del objetivo. Para que este fenómeno no suceda, el número de muestras tomadas debe ser el suficiente para poder reconstruir la señal de forma inequívoca.

3.2.3 Teorema de Nyquist

Según este principio, la frecuencia de muestreo debe ser, al menos, el doble de la frecuencia máxima contenida en la señal para evitar *aliasing* Doppler y asegurar una reconstrucción precisa de la información [38]. Al implementar este criterio en nuestro código, se optimizará la adquisición de datos, permitiendo obtener mediciones más precisas de la velocidad y posición de los objetivos detectados.

$$f_s > 2 \cdot f \quad (3 - 1)$$

Donde f_s es la frecuencia de muestreo y f la frecuencia de la señal emitida por el radar.

De esta manera, a medida que se incrementa la frecuencia de muestreo, la reconstrucción de la onda se vuelve progresivamente más precisa, permitiendo una mejor representación de la señal original.

Si, desde el inicio, la frecuencia de muestreo seleccionada fuera el doble de la frecuencia de Nyquist, se garantizaría una captura de datos suficiente para reconstruir la señal sin ambigüedades, cumpliendo con el criterio de muestreo adecuado. En este caso específico, el resultado de dicha elección se vería reflejado en la gráfica ilustrada en la Figura 3-5, donde la señal reconstruida presentaría una mayor coherencia con su versión original y una reducción significativa en la distorsión espectral.

Sin embargo, en la práctica, incluso al cumplir con la condición mínima impuesta por el Teorema de Nyquist, pueden persistir ciertos errores de cuantización y discretización.

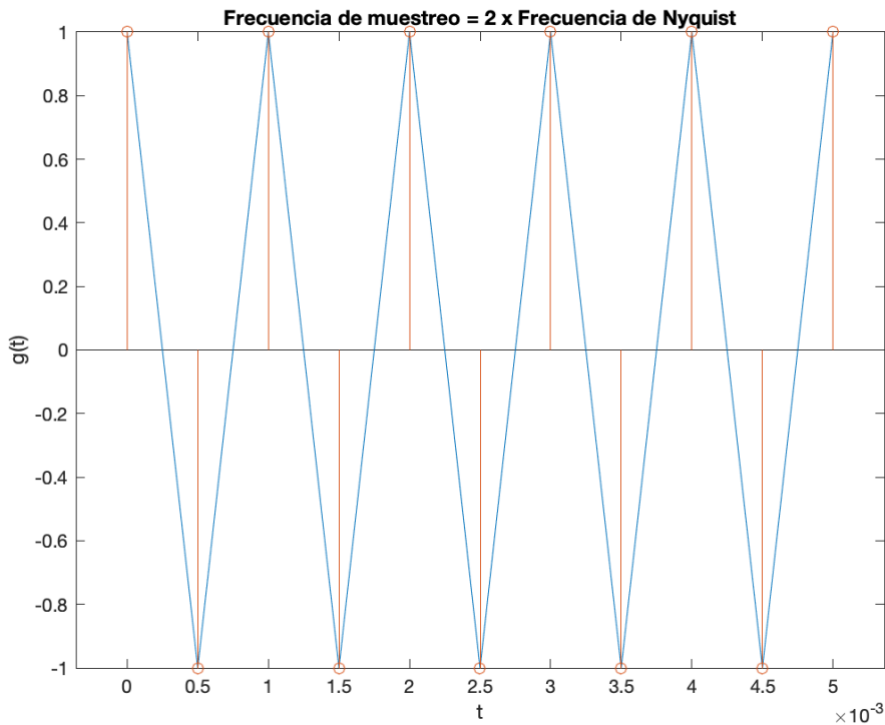


Figura 3-5 $f_s = 2 \cdot f$

Aunque los datos obtenidos sean verídicos, la baja densidad de muestreo puede provocar la pérdida de una cantidad significativa de información relevante, lo que puede afectar la precisión del análisis espectral y la interpretación de los parámetros del blanco.

Para garantizar una reconstrucción más fiel de la señal y preservar la integridad de la información contenida en ella, es necesario incrementar la frecuencia de muestreo. Al hacerlo, se mejora la resolución temporal y espectral del sistema, lo que permite capturar con mayor precisión las variaciones dinámicas de la señal y minimizar la pérdida de detalles críticos en el proceso de detección y caracterización del blanco.

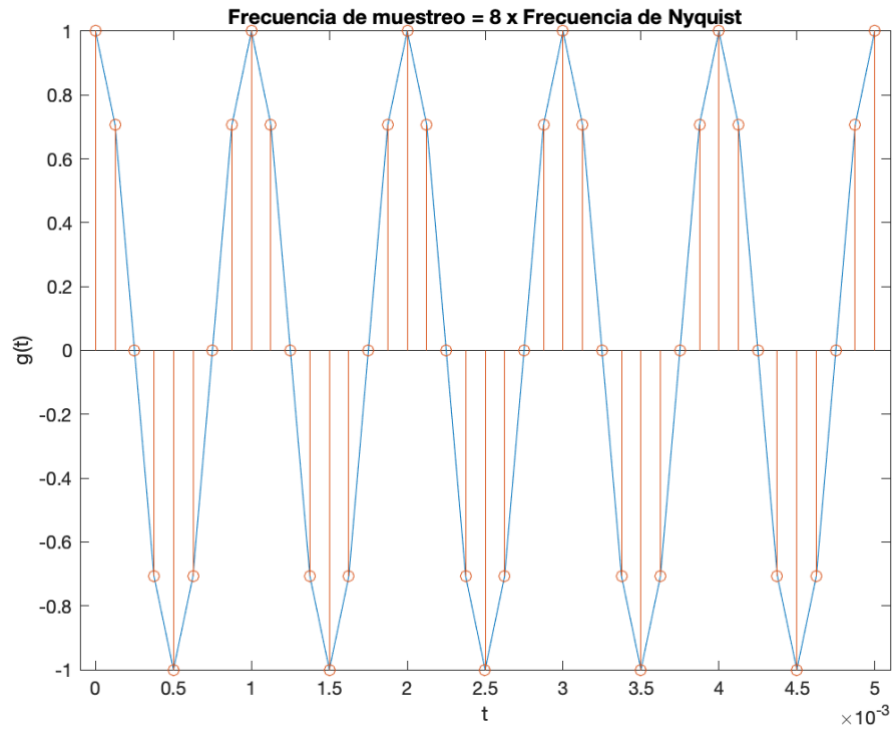


Figura 3-6 $f_s = 8 \cdot f$

En la Figura 3-6 se observa que al incrementar la frecuencia de muestreo en un factor de cuatro con respecto a la Figura 3-5, se obtiene una reconstrucción más precisa de la señal, lo que permite una mejor representación de sus características espectrales y una reducción en la distorsión introducida por la discretización.

A partir de un determinado umbral en la frecuencia de muestreo, la reconstrucción de la señal comienza a mostrar resultados significativamente más precisos, logrando finalmente una resolución óptima que permite una mejor correspondencia con la señal original. Este efecto se debe a la captura de un mayor número de puntos representativos de la onda, lo que reduce la pérdida de información y minimiza los errores de interpolación.

Sin embargo, es importante considerar que no siempre es viable incrementar indefinidamente la frecuencia de muestreo debido a las limitaciones impuestas por los sistemas de adquisición de datos. La conversión de señales analógicas a digitales es un proceso que requiere un consumo energético significativo y puede generar una sobrecarga en los sistemas de procesamiento, lo que conlleva problemas de eficiencia y posibles limitaciones en el hardware.

Por esta razón, se debe buscar un equilibrio óptimo entre la cantidad de muestras adquiridas y la calidad de la reconstrucción de la señal, garantizando que se alcancen niveles adecuados de precisión sin comprometer la eficiencia energética del sistema. Una selección adecuada de la frecuencia de

muestreo permitirá optimizar los recursos disponibles, asegurando un rendimiento óptimo en términos de resolución espectral y consumo energético, evitando llegar a casos como los mostrados en la Figura 3-7.

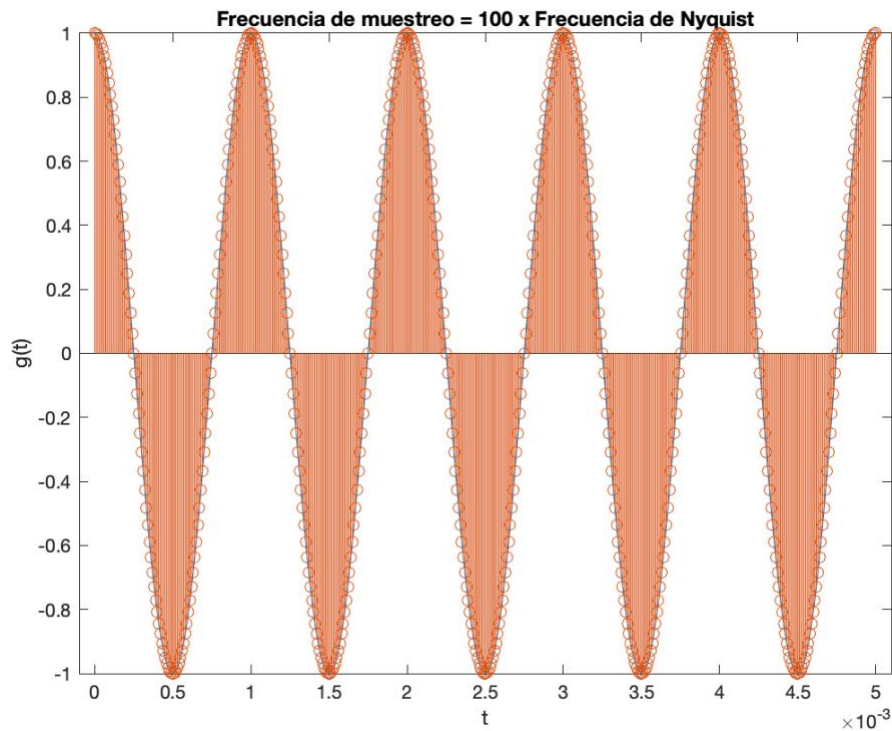


Figura 3-7 $f_s = 100 \cdot f$

A continuación, se introduce el fenómeno de la velocidad máxima no ambigua, directamente relacionado con el Teorema de Nyquist al producirse cuando la frecuencia con la que son tomadas las muestras no es suficiente.

3.2.4 Velocidad máxima no ambigua

El término de velocidad máxima no ambigua hace referencia a la velocidad Doppler a partir de la cual el sistema radar pierde la capacidad de detectar de manera fiable los blancos en movimiento. Esto ocurre debido a las limitaciones impuestas por el rango de frecuencias procesables por el radar, lo que genera ambigüedades en la medición de la frecuencia Doppler. Cuando un blanco en movimiento alcanza o supera esta velocidad crítica, la señal reflejada puede ser indistinguible de otras contribuciones espectrales, lo que impide una correcta estimación de su velocidad real.

Este fenómeno se debe principalmente a la tasa de muestreo del radar, determinada por la frecuencia de repetición de pulso. Si la PRF es insuficiente en relación con la velocidad del blanco, se produce un fenómeno de *aliasing* Doppler, en el cual la frecuencia Doppler medida se pliega dentro del espectro observable, generando interpretaciones erróneas sobre la velocidad y la dirección del objetivo. Como consecuencia, el radar puede no detectar el blanco correctamente o asignarle una velocidad incorrecta, afectando su seguimiento y clasificación dentro del sistema de observación. [32]

En el contexto del radar pulsado, existe una condición particular en la que un objetivo en movimiento no puede ser detectado debido a la sincronización entre la frecuencia de repetición de los pulsos y la velocidad del blanco. Este fenómeno se conoce como velocidad ciega del radar y ocurre cuando la frecuencia Doppler del eco recibido coincide con un múltiplo de la frecuencia de repetición de los pulsos,

lo que provoca una ambigüedad en la medición de la velocidad y la imposibilidad de detección del objetivo. Matemáticamente, esta condición se da cuando se cumple la siguiente igualdad:

$$\frac{f_d}{PRF} = 1 \quad (3 - 2)$$

Donde f_d es la frecuencia Doppler [Hz] y PRF la tasa de repetición de pulsos [Hz]. La PRF, al ser un dato conocido, lo despejamos y obtenemos el valor de la frecuencia Doppler del blanco. Posteriormente, sabiendo que:

$$v = \frac{f_d \cdot c}{2 \cdot f}, \quad \text{reescrito de otra forma: } v = \frac{PRF \cdot \lambda}{2}, \quad (3 - 3)$$

donde c toma el valor de 3×10^8 [metros/segundo] y f es la frecuencia de trabajo del radar [Hz], es posible determinar la velocidad umbral a partir de la cual se genera ambigüedad en la interpretación de la velocidad del blanco conociendo estos parámetros. Como resultado, la estimación de la velocidad del blanco puede volverse equívoca, dificultando su correcta identificación y seguimiento dentro del entorno de observación del radar, siendo la secuencia la observada de la figura 3-8 a la figura 3-9.

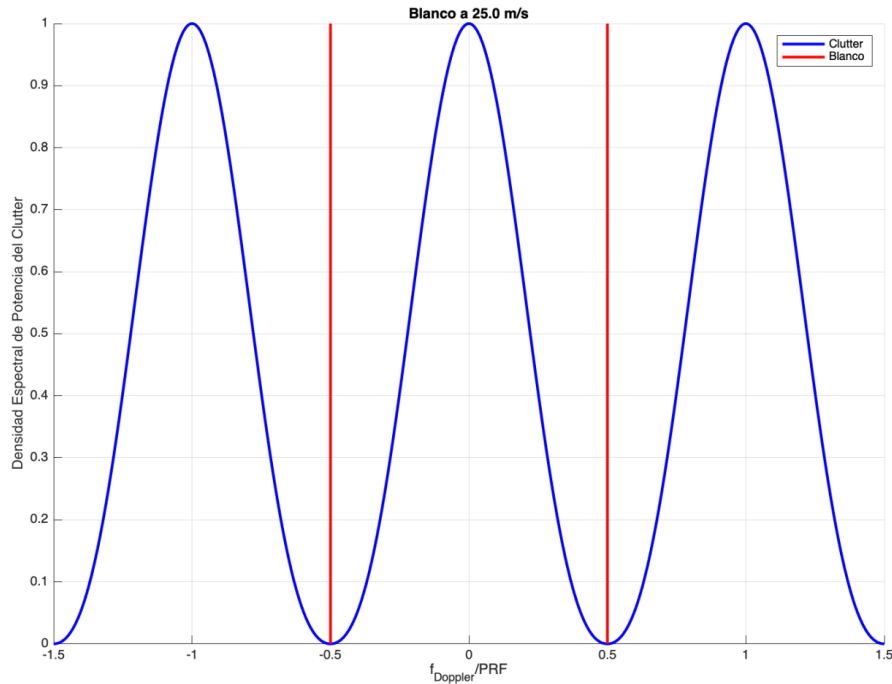


Figura 3-8 Frecuencia normalizada generada por un blanco a 25m/s

En este contexto, la frecuencia Doppler obtenida corresponde a la generada por un blanco que se desplaza con una velocidad de 25 m/s y el radar opera con una PRF de 100Hz y una λ de valor 1m. No obstante, cuando el blanco incrementa su velocidad y alcanza o supera el umbral de 50 m/s, se genera una ambigüedad en la estimación de su velocidad real debido a las limitaciones inherentes a los parámetros operativos del radar.

Como consecuencia, la señal reflejada experimenta un plegamiento espectral, dando lugar al *aliasing* Doppler, en el cual la frecuencia medida se asigna incorrectamente a una velocidad distinta de la real como se refleja.

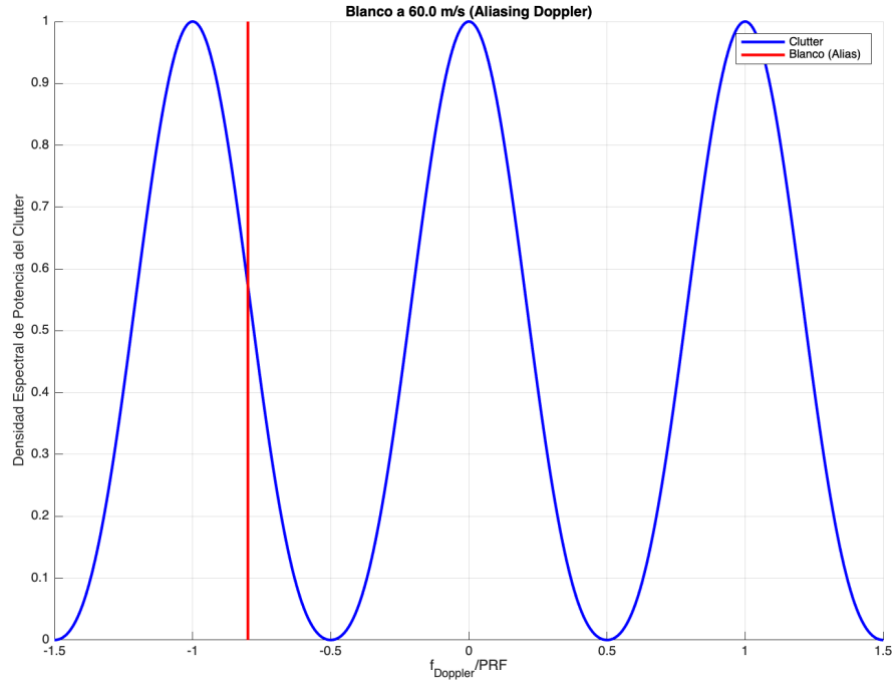


Figura 3-9 Frecuencia normalizada generada por un blanco a 60m/s

Dicho efecto compromete la fiabilidad de la medición, dificultando la correcta identificación y seguimiento del blanco.

Por otro lado, la aparición de discrepancias en la interpretación de los datos no se debe únicamente a la existencia de una velocidad máxima no ambigua en el sistema radar. Existen otros factores que pueden comprometer la precisión de la información obtenida, entre ellos, una tasa de muestreo insuficiente en la detección de un contacto.

Cuando el número de muestras adquiridas en un período determinado es demasiado bajo, se reduce la capacidad del sistema para reconstruir con fidelidad la señal reflejada. Como consecuencia, la información crítica sobre el blanco en movimiento puede perderse en los intervalos de tiempo transcurridos entre pulsos consecutivos. Esta limitación puede afectar la correcta estimación de la velocidad del blanco y su trayectoria, introduciendo incertidumbre en el proceso de identificación y seguimiento.

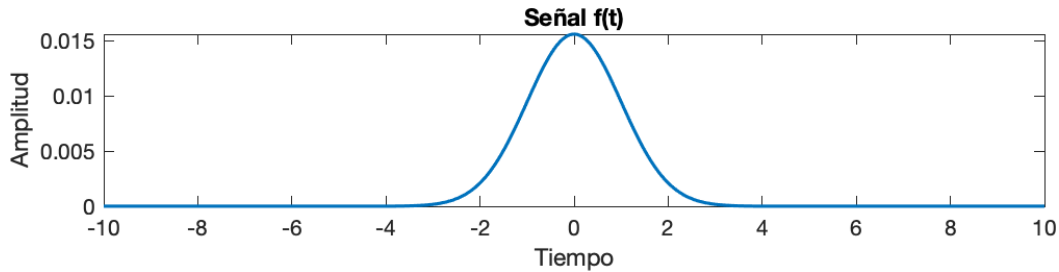
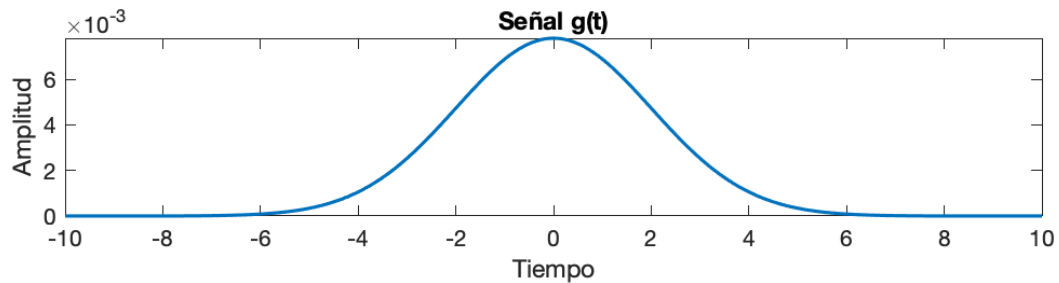
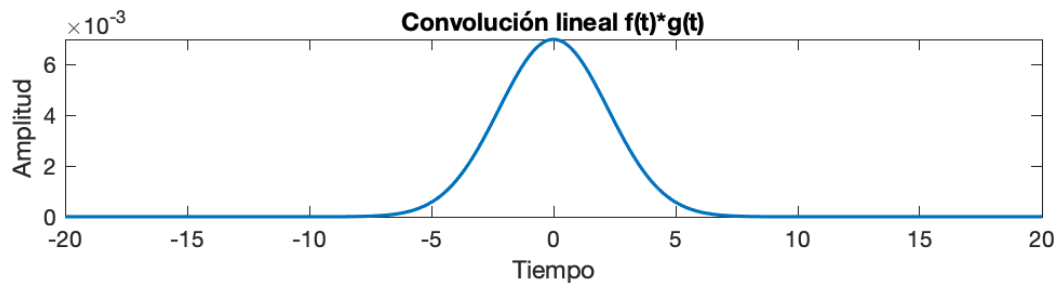
Para mitigar esta pérdida de información y mejorar la precisión en la detección y caracterización de los blancos, es fundamental aplicar el Teorema de Nyquist en el procesamiento de señales del radar.

3.2.5 Convolución

La convolución es una operación matemática fundamental en el análisis de señales y sistemas, que permite combinar dos funciones para caracterizar la interacción y superposición entre ellas. Formalmente, la convolución de dos funciones se define como la integral del producto de una función con una versión desplazada de la otra. Este proceso implica deslizar una de las funciones sobre la otra, multiplicar sus valores en cada punto de superposición y calcular la suma ponderada de estos productos. El resultado es una nueva función que describe la influencia acumulativa de ambas funciones originales en el dominio considerado.

$$(f * g)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t - \tau) d\tau \quad (3 - 4)$$

Este concepto será importante a lo largo del desarrollo ya que, en aplicaciones prácticas, la convolución se emplea en el diseño y análisis de filtros en el dominio de la frecuencia. Se define entonces que la convolución de dos señales en el dominio del tiempo es equivalente a la multiplicación de sus espectros en el dominio de la frecuencia. Esta propiedad es fundamental en el procesamiento de señales, ya que permite diseñar y aplicar filtros de manera eficiente mediante técnicas espectrales, facilitando la manipulación de señales en sistemas digitales y analógicos.

Figura 3-10 Señal $f(t)$ Figura 3-11 Señal $g(t)$ Figura 3-12 Convolución lineal $f(t)*g(t)$

3.3 Transformación de datos continuos a tiempo discreto

En este apartado se procederá al desarrollo del núcleo central de este trabajo. Uno de los principales desafíos en la implementación práctica del análisis de señales es la imposibilidad de registrar y procesar una señal en formato digital en un dominio de tiempo continuo, debido a la enorme cantidad de información que ello implicaría.

Por esta razón, con el fin de realizar la conversión de señales analógicas a digitales y posibilitar su tratamiento computacional, se trabajará en el dominio del tiempo discreto. En este contexto, se abordará el estudio de la Transformada de Fourier en tiempo discreto (*Discrete-Time Fourier Transform*, DTFT), la cual permite el análisis espectral de señales muestreadas. Además, se aplicarán las propiedades de conversión de producto a convolución, lo que facilitará la manipulación de la señal en el dominio de la frecuencia. Asimismo, se hará uso del concepto de la función delta de Dirac como herramienta fundamental para el proceso de muestreo, asegurando una representación matemática rigurosa y precisa de la señal discreta.

3.3.1 Transformada de Fourier en tiempo discreto

En el ámbito matemático, la Transformada de Fourier en tiempo discreto constituye una herramienta fundamental para el análisis espectral de secuencias discretas de datos. Su aplicación permite estudiar la composición frecuencial de señales muestreadas, proporcionando una representación en el dominio de la frecuencia a partir de datos en el dominio del tiempo discreto.

En este caso, se empleará la *DTFT* para analizar muestras extraídas de una función continua, lo que permite caracterizar su comportamiento espectral en sistemas de procesamiento digital de señales. El término "tiempo discreto" hace referencia al hecho de que esta transformada opera exclusivamente sobre secuencias discretizadas, en las cuales las muestras han sido adquiridas en instantes específicos y espaciados a intervalos regulares en el tiempo.

Desde un punto de vista conceptual, la aplicación de la *DTFT* a un conjunto de muestras equiespaciadas de una señal continua genera un espectro de frecuencia compuesto por múltiples copias periódicas del espectro original. Estas copias aparecen separadas por intervalos equivalentes a la frecuencia de muestreo, y en ciertos casos pueden solaparse, dependiendo de la tasa de muestreo utilizada. De acuerdo con los principios establecidos en el teorema del muestreo de Nyquist, bajo condiciones adecuadas, la señal continua original puede ser reconstruida de manera exacta a partir de su *DTFT* y, por ende, también a partir de su conjunto de muestras discretas.

Partimos de la base de que la transformada de Fourier es la mostrada en la ecuación 3-5.

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \cdot e^{-j2\pi f t} dt \quad (3 - 5)$$

Donde se encuentra que $G(f)$ trabaja en el dominio del tiempo. No obstante, la adquisición directa de $g(t)$ en un sistema digital es inviable, dado que no es posible almacenar información en tiempo continuo. Por esta razón, la función $G(f)$, dependiente del tiempo, será reemplazada por una representación en el dominio de la frecuencia.

Aunque no se dispone de $g(t)$ en su forma continua, es posible reconstruir esta señal si se lleva a cabo un muestreo adecuado, empleando un número suficiente de muestras y un período de muestreo apropiado. Bajo estas condiciones, la Transformada de Fourier de la señal muestreada corresponde a la expresada en la ecuación 3-6.

$$G(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(n \cdot T_s) \cdot e^{-j2\pi f (n \cdot T_s)} \quad (3 - 6)$$

Dando lugar a una sumatoria donde el término t sería reemplazado por el término $n \cdot T_s$, siendo n el número de muestras realizadas y T_s el periodo de muestreo.

3.3.2 Función delta de Dirac

En el análisis matemático, la función delta de Dirac (también denominada distribución δ) es una función generalizada definida en números reales, cuya característica principal es que su valor es cero en todos los puntos excepto en el origen como se puede observar en la figura 3-11 y su integral a lo largo de toda su recta es igual a uno, como viene definido en la ecuación 3-7.

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & t \neq 0 \\ \infty, & t = 0 \end{cases} \quad (3 - 7)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (3-8)$$

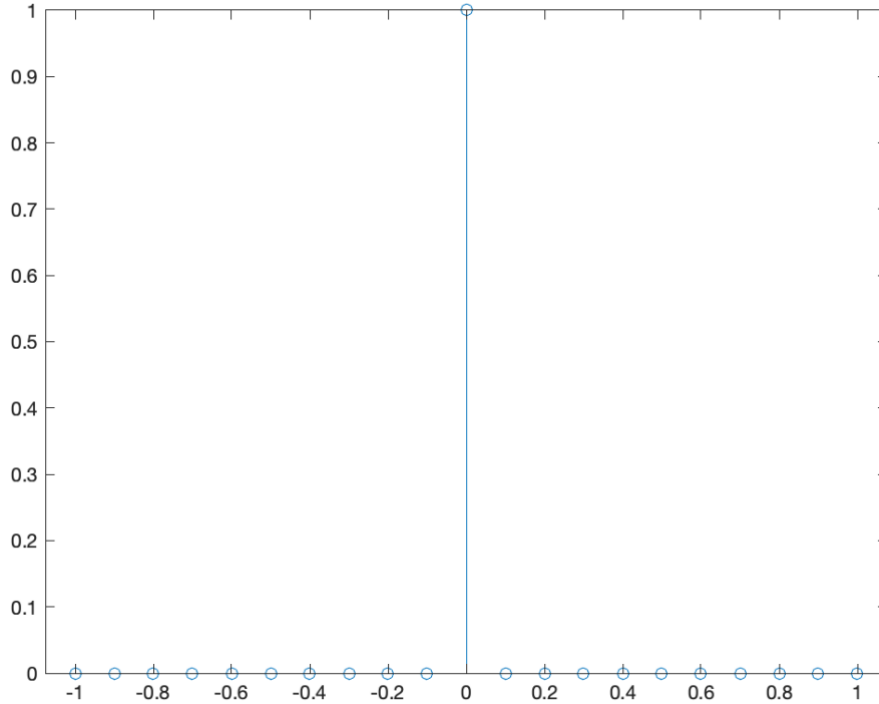


Figura 3-13 Función delta de Dirac

3.3.3 Propiedades de Fourier

A continuación, se mostrará cómo aplicando la *DTFT* e introduciendo la función delta Dirac, se consigue representar la señal continua $g(t)$ en tiempo discreto realizando una serie de pasos y aplicando propiedades de la Transformada de Fourier.

El problema que se encuentra es que no se tiene forma de digitalizar $g(t)$. En cambio, de lo que si se dispone es de muestras con un periodo de muestreo T_s .

$$g(n \cdot T_s), \quad \text{para } n = (-\infty, \infty) \quad (3-9)$$

En primer lugar, definimos la señal disponible para trabajar en tiempo discreto, reemplazando $g(t)$ por $\bar{g}(t)$, donde esta última adquirirá el valor mostrado en la ecuación 3-10.

$$\bar{g}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(n \cdot T_s) \cdot \delta(t - nT_s) \quad (3-10)$$

Donde se introduce el término de la función delta Dirac, de tal forma que se logra aproximar la función a lo que se busca. En cambio, se sigue teniendo en función del tiempo.

De igual forma, si se hace la Transformada de Fourier de esta función se obtendría la ecuación mostrada en 3-11.

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{g}(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (3-11)$$

Ahora bien, lo realmente interesante y lo que se busca ahora es que la Transformada de Fourier en tiempo discreto de la función $\bar{g}(t)$ sea lo más próxima posible a la Transformada de Fourier de la función $g(t)$, de tal forma que se obtengan los mismos resultados tomando muestras de forma periódica que en tiempo continuo.

Por consiguiente, si el periodo de muestreo T_s cumple con el Teorema de Nyquist, es posible reconstruir la señal obteniendo así $g(t)$ de $\bar{g}(t)$. De tal forma que, usando la definición de $\bar{g}(t)$ en la Transformada de Fourier en tiempo discreto obtenemos lo ilustrado en 3-12.

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(n \cdot T_s) \cdot \delta(t - nT_s) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (3 - 12)$$

De esta forma, ya se ha introducido el sumatorio dentro de la integral, lo cual es estrictamente necesario para poder obtener $g(t)$ de $\bar{g}(t)$. Así pues, se relaciona que la expresión 3-12 es igual a 3-13.

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(t) \cdot \delta(t - nT_s) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (3 - 13)$$

Una propiedad fundamental de la Transformada de Fourier es su linealidad. Esto implica que, al aplicar este principio, se verifica que la integral de una suma de funciones es equivalente a la suma de las integrales de dichas funciones, obteniendo así la ecuación 3-14.

$$G(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \cdot \delta(t - nT_s) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (3 - 14)$$

En cambio, el objetivo es operar en el dominio de la frecuencia con el propósito de analizar la señal en un contexto de tiempo discreto. Para lograr esta transformación, se aplicará la propiedad de Fourier presentada en las ecuaciones 3-15 y 3-16, la cual permite la conversión del dominio temporal al dominio frecuencial.

$$\delta(t - nT_s), \quad \text{Función en dominio temporal} \quad (3 - 15)$$

$$\delta\left(f - \frac{n}{T_s}\right), \quad \text{Función en dominio frecuencial} \quad (3 - 16)$$

Teniendo en cuenta los aspectos previamente analizados, si se aplica la Transformada de Fourier a la ecuación 3-13, dado que esta representa un producto en el dominio temporal, el resultado obtenido corresponderá a la convolución de sus respectivas transformadas, tal como se expresa en la ecuación 3-16

$$G(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} G(f) * \delta\left(f - \frac{n}{T_s}\right) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} G\left(f - \frac{n}{T_s}\right) \quad (3 - 17)$$

De manera que finalmente se consigue un método por el cual se representa el espectro radar de un blanco móvil en un radar pulsado en tiempo discreto. Con la 3-17, es posible representar de forma periódica la señal $g(t)$ a base de muestras.

Desde una perspectiva gráfica, el fenómeno que se observa es el siguiente: Con la ecuación 3-17 lo que se consigue generar es una función en frecuencia, de tal forma que haciendo la Transformada de Fourier se lograría revertir el proceso llegando la función $g(t)$. Ahora bien, el objetivo es lograr que la reconstrucción periódica de la señal en tiempo discreto sea prácticamente indistinguible de su contraparte periódica en tiempo continuo.

Para ello, es necesario garantizar que dichos pulsos no se solapen, pero que, al mismo tiempo, se encuentren lo más próximos posible entre sí, preservando así la integridad de la señal reconstruida como se muestra en la figura 3-14. En este contexto, la aplicación de la ecuación 3-17 permite el solapamiento controlado de las señales bajo la condición de que se cumpla estrictamente la igualdad establecida en la ecuación 3-18. De este modo, se consigue una representación discreta que mantiene la coherencia

estructural con la señal continua original, optimizando el proceso de reconstrucción en el dominio discreto como se muestra en la figura 3-14.

$$\frac{1}{T_s} > B \quad (3 - 18)$$

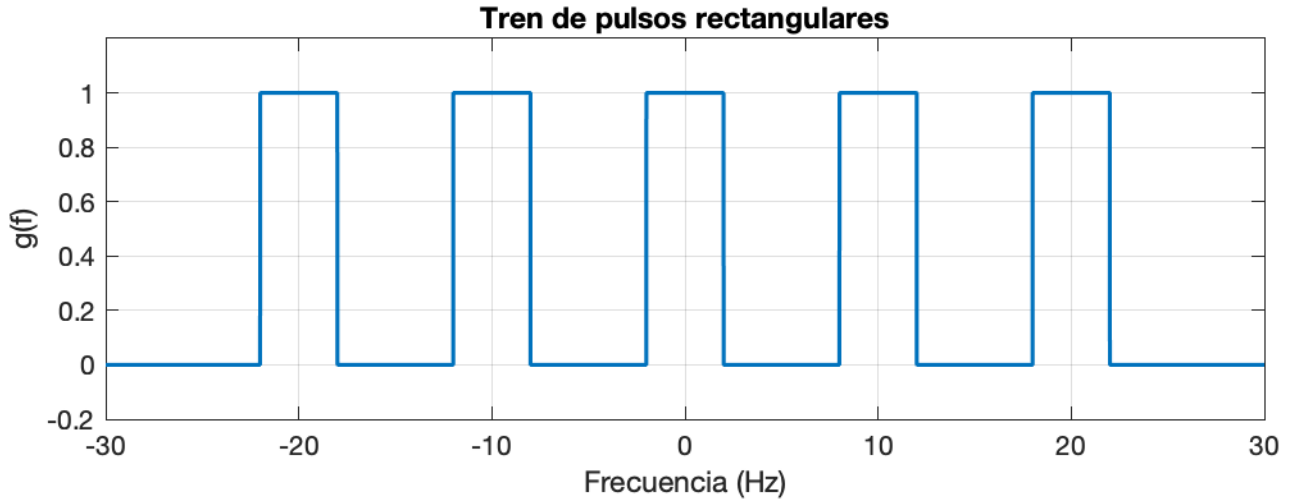


Figura 3-14 Tren de pulsos en dominio de frecuencia

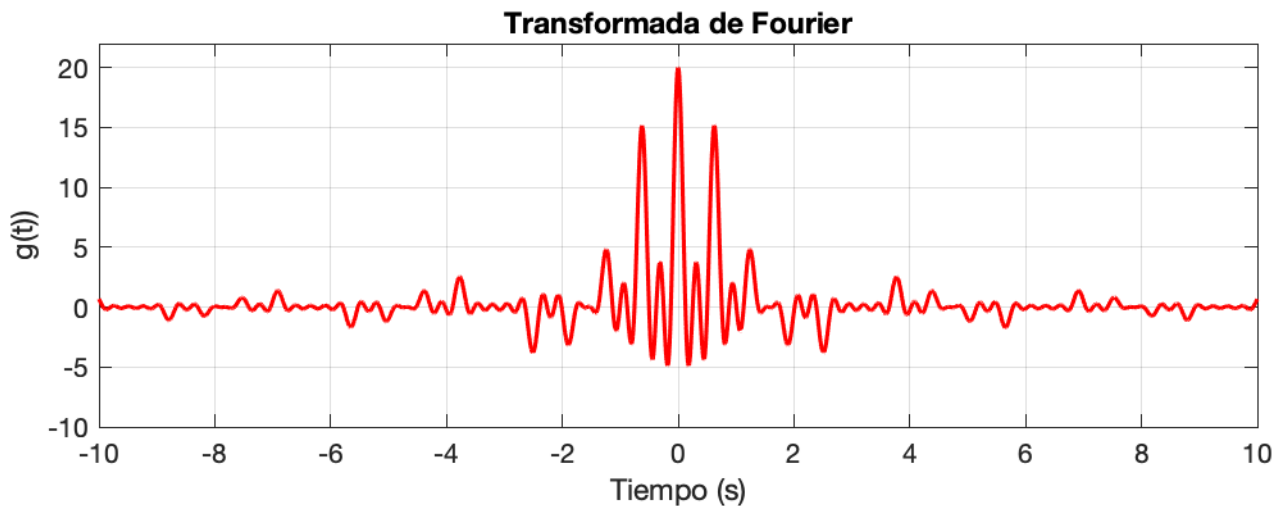


Figura 3-15 Tren de pulsos en el dominio del tiempo

3.4 Interfaz

En este apartado se describe el procedimiento de desarrollo de la interfaz gráfica a través de Matlab, cuyo propósito es permitir la interacción y observación de las variaciones en los datos obtenidos a medida que se modifican diferentes parámetros operativos del radar. Para cumplir con este objetivo, se han implementado dos códigos independientes.

El primer código integra dos funciones principales que facilitan la interacción directa del operador con la interfaz gráfica, permitiendo visualizar de manera dinámica las variaciones en los gráficos relacionados con el Teorema de Nyquist y la velocidad máxima no ambigua.

El segundo código genera una interfaz complementaria en la cual es posible modificar los parámetros del radar, observando así los cambios resultantes en representaciones gráficas tanto en el dominio temporal como en el dominio frecuencial, donde se aplica la Transformada de Fourier para pasar de un dominio a otro.

3.4.1 Funciones principales

En primer lugar, al pulsar el botón *run* en Matlab, nos aparecerá una pestaña previa a los gráficos, con título ‘Datos del usuario’ donde aparecerán tres datos del usuario a rellenar: Grupo, número y cuerpo, donde el grupo y cuerpo se deberá elegir seleccionando en un desplegable y el número deberá ser introducido por el propio operador como se observa en la figura 3-16.

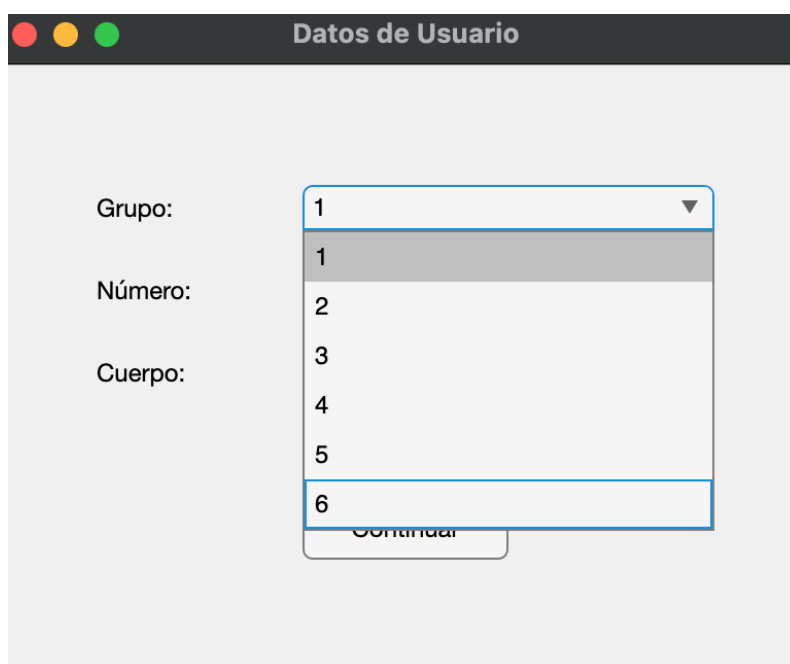
Esto, está diseñado de tal forma que se enfoque a futuras prácticas llevadas a cabo por el profesorado de Centro Universitario de la Defensa, de tal forma que el alumno que las esté realizando, introduzca sus datos a la hora de interactuar con el código.

Una vez el usuario rellene los datos, pulsando el botón continuar, accederá a la interfaz.



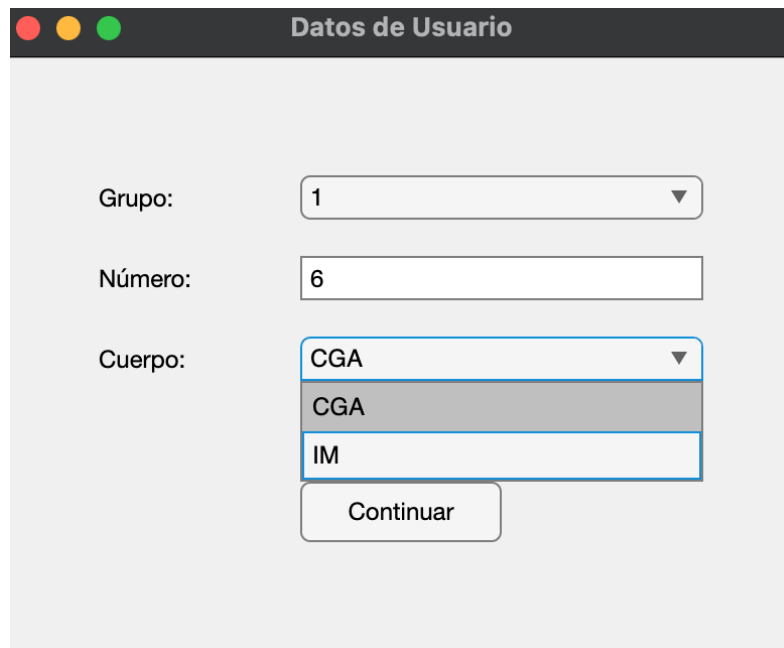
The screenshot shows a window titled 'Datos de Usuario' with a dark header bar containing three colored window control buttons (red, yellow, green). The main area is light gray and contains three labels on the left: 'Grupo:', 'Número:', and 'Cuerpo:'. To the right of each label is an input field. The 'Grupo:' field is a dropdown menu showing '1'. The 'Número:' field is a text box containing '6'. The 'Cuerpo:' field is a dropdown menu showing 'CGA'. Below these fields is a button labeled 'Continuar'.

Figura 3-16 Datos del usuario



This screenshot shows the same 'Datos de Usuario' window, but the 'Grupo:' dropdown menu is open. The dropdown list displays a list of numbers from 1 to 6. The number '1' is highlighted at the top of the list, and '6' is highlighted at the bottom. The 'Número:' and 'Cuerpo:' fields and the 'Continuar' button remain visible in the background.

Figura 3-17 Datos del usuario. Desplegable del grupo



Datos de Usuario

Grupo: 1

Número: 6

Cuerpo: CGA

Continuar

Figura 3-18 Datos del usuario. Desplegable del cuerpo

Una vez se pulsa el botón continuar, se nos muestra en pantalla una nueva pestaña con título ‘Interfaz Radar’ como se muestra en la figura 3-19 donde se pueden observar una serie de datos.

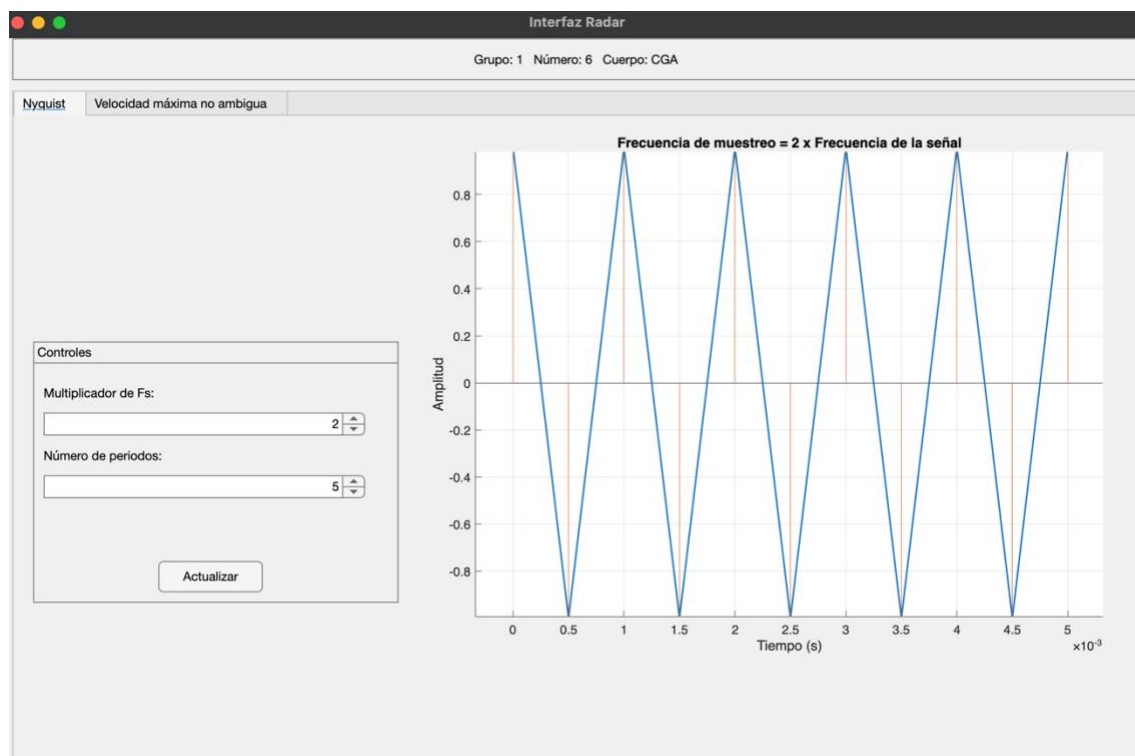


Figura 3-19 Interfaz del radar

Por un lado, los datos del usuario en la parte superior anteriormente rellenados, se guardan y se plasman en la parte superior de la interfaz del radar como se observa en la figura 3-20.

Grupo: 1 Número: 6 Cuerpo: CGA

Figura 3-20 Interfaz del radar. Datos del usuario

Por otro lado, se muestra en pantalla en la parte inferior izquierda de los datos del usuario dos ventanas a elegir para interactuar: Nyquist y Velocidad máxima no ambigua como se muestra en la figura 3-21.

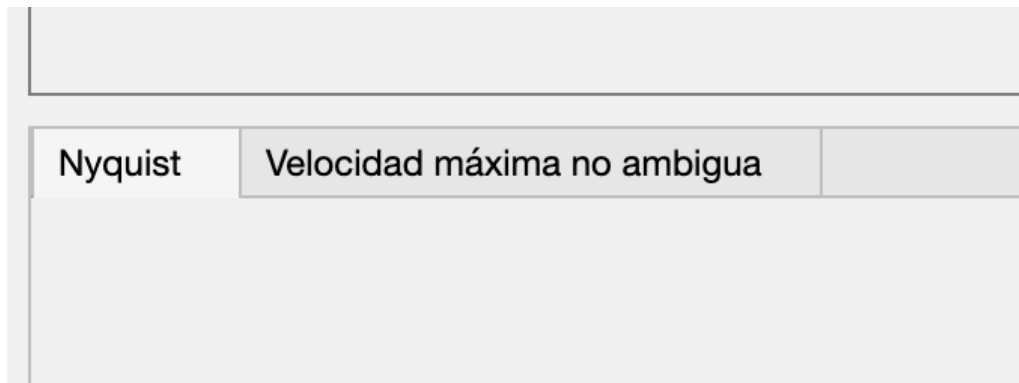


Figura 3-21 Interfaz del radar. Ventanas de Nyquist y Velocidad máxima no ambigua

Dentro de cada una de ellas hay datos a modificar por el usuario para poder interactuar con los parámetros del radar y ver cómo estos modifican los gráficos generados.

En la ventana de Nyquist, lo que se trata es que el operador pueda comprobar los efectos de muestrear una señal. Para ello, cuenta con un panel de control donde se podrán modificar dos valores: El primero de ellos será el factor que multiplique a la frecuencia de la señal como se muestra en la ecuación 3-19.

$$f_s = n \cdot f \quad (3 - 19)$$

Donde n es el número de muestras que se toman, recordando que siempre deberá tener al menos el valor de dos para poder reconstruir una señal como se establece en el Teorema de Nyquist.

En segundo lugar se tiene el número de periodos de la onda. Ambos valores pueden ser introducidos o bien a través de un *spinner* o manualmente, dando a elegir al operador entre estas dos opciones como se muestra en la figura 3-22.

A screenshot of a control panel titled 'Controles'. It contains two input fields with spinner controls. The first field is labeled 'Multiplicador de Fs:' and has a value of '2'. The second field is labeled 'Número de periodos:' and has a value of '5'. At the bottom of the panel is a button labeled 'Actualizar'.

Figura 3-22 Interfaz del radar. Panel de controles Nyquist

Cuando se modifica cualquiera de los parámetros, es necesario pulsar el botón ‘Actualizar’, a fin de que los cambios queden reflejados en la representación gráfica. Esta gráfica se genera en la sección derecha de la interfaz, tal como se ilustra en la Figura 3-23.

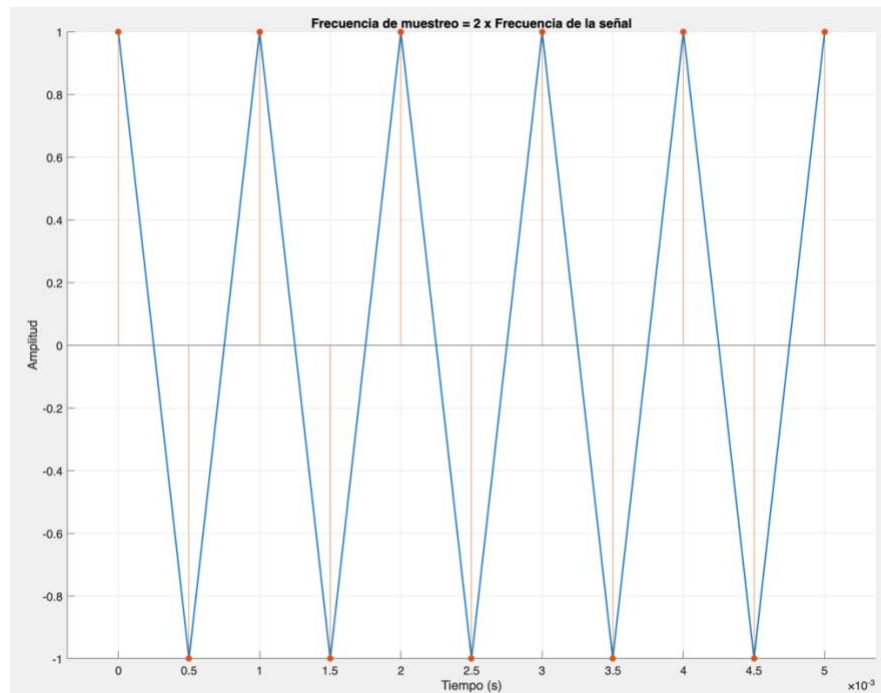


Figura 3-23 Interfaz del radar. Gráfico del Teorema de Nyquist

La figura 3-23, representa cómo se reconstruye una señal cuando se cumplen los mínimos establecidos en el Teorema de Nyquist, tal y como se muestra en la ecuación 3-1.

En segundo lugar tenemos la pestaña de ‘Velocidad máxima no ambigua’. Seleccionando dicha ventana, la presentación que aparecerá sobre la pantalla será la mostrada en la figura 3-24.

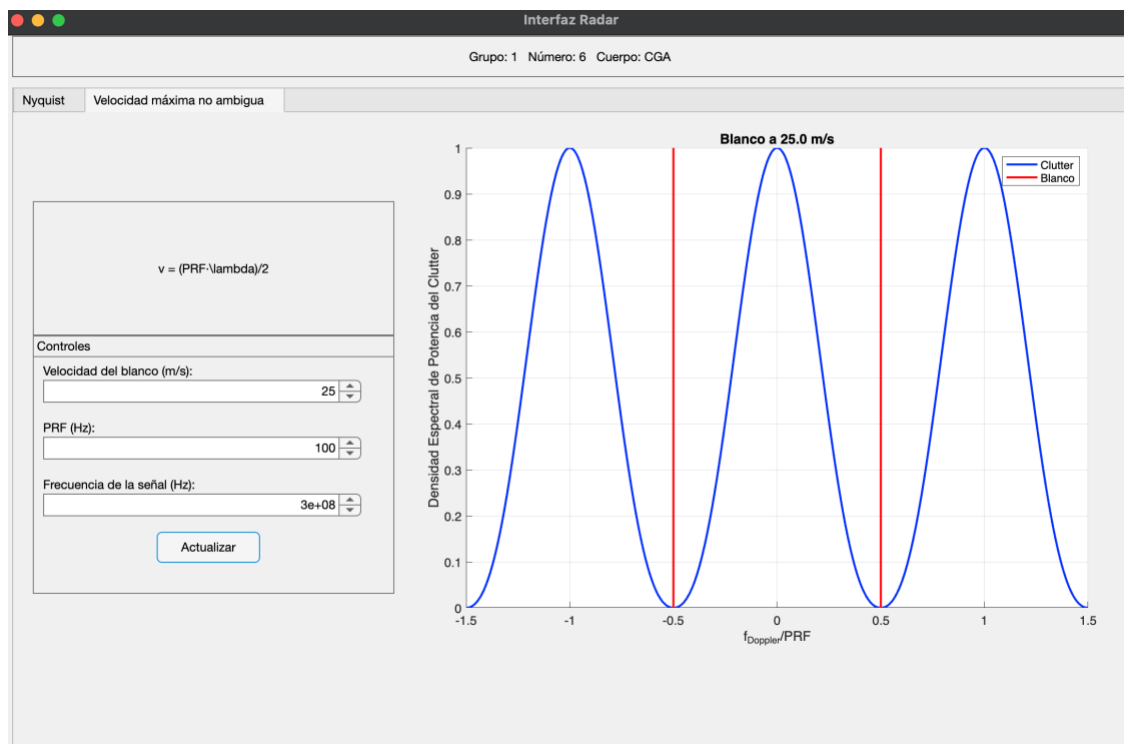


Figura 3-24 Interfaz del radar. Presentación ventana de velocidad máxima no ambigua

Esta ventana tiene como objetivo permitir al operador interpretar cómo, en función de la velocidad del blanco y de los parámetros del radar, este puede visualizarse correctamente o, en caso de superar la velocidad umbral, dar lugar a aliasing Doppler.

De nuevo, observamos que se mantienen los datos del usuario. Sin embargo, el resto de datos varían con respecto a la venta de Nyquist.

De la misma manera que en la anterior ventana, existe un panel de controles sobre el cual el operador podrá modificar los siguientes parámetros: Velocidad del blanco, PRF y Frecuencia de la señal. En la parte superior del panel, se incluye la ecuación sobre la cual se obtiene la velocidad máxima no ambigua del blanco como se muestra en la figura 3-25.

$v = (PRF \cdot \lambda) / 2$

Controles

Velocidad del blanco (m/s):

PRF (Hz):

Frecuencia de la señal (Hz):

Figura 3-25 Interfaz del radar. Panel de controles Velocidad máxima no ambigua

Una vez más, los valores pueden ser introducidos o bien a través de un *spinner* o manualmente, siendo necesario de nuevo activar la actualización pulsando el botón ‘Actualizar’, con el fin de que los cambios queden reflejados en la representación gráfica mostrada en la figura 3-26.

Esta figura, muestra cómo se visualizaría un contacto que se desplaza a 25m/s cuando el radar opera a una frecuencia de 3×10^8 Hz y una PRF de 100 Hz.

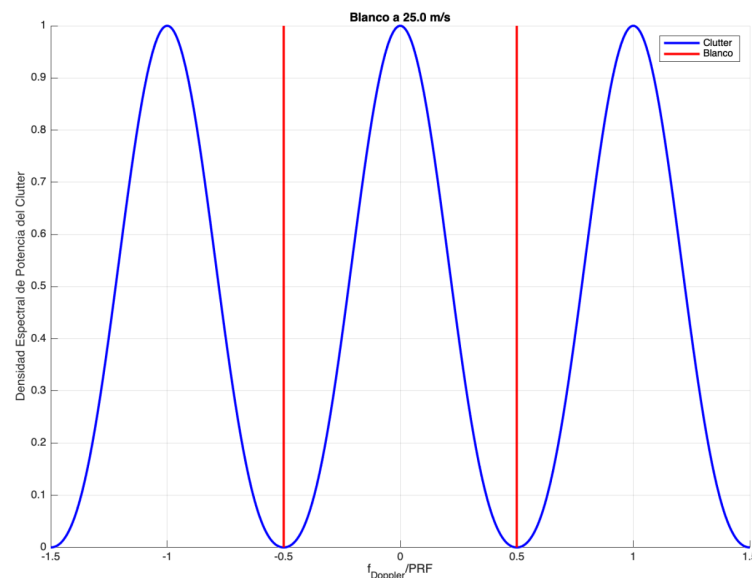


Figura 3-26 Interfaz del radar. Gráfica velocidad máxima no ambigua

En el segundo código, se encuentra el tercer aspecto relevante a tratar sobre el análisis del espectro radar de un blanco móvil: La Transformada de Fourier.

A diferencia del anterior código, una vez se selecciona el comando *run* en la pestaña de edición de Matlab, se abre directamente la interfaz sobre la que se va a experimentar, siendo esta la mostrada en la figura 3-27.

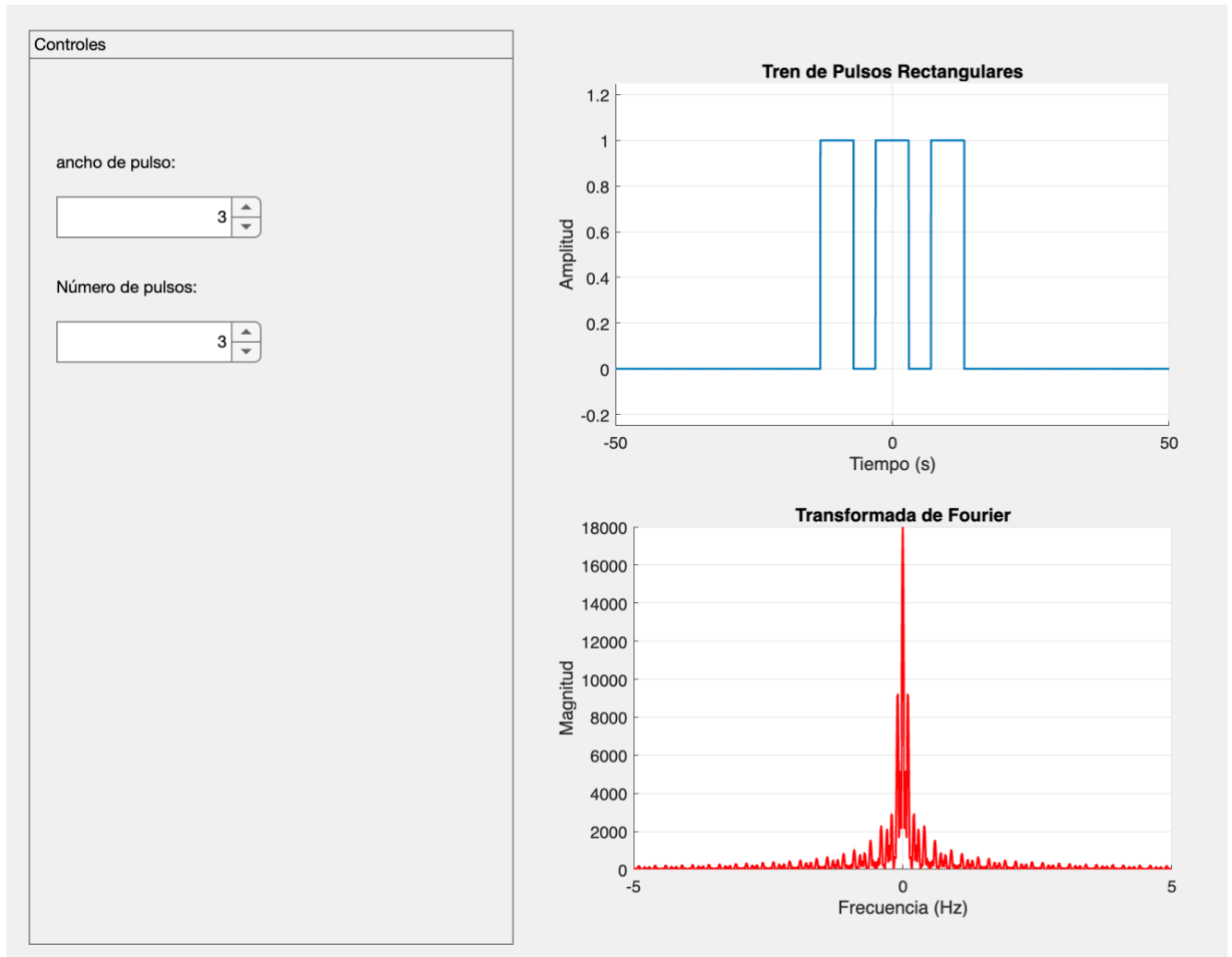


Figura 3-27 Interfaz del radar. Transformada de Fourier

Una vez se pone en marcha el código y aparece la interfaz, se podrán ver en pantalla una serie de datos. En la parte derecha se tendrán los dos gráficos generados: El primero situado en la esquina superior derecha que mostrará la señal en el dominio del tiempo, mientras que en la parte inferior derecha se mostrará su Transformada de Fourier en el dominio de frecuencia, ya vistos anteriormente en las figuras 3-14 y 3-15.

Si se observa, en la parte izquierda de la interfaz se encuentran dos parámetros a modificar por el usuario: El ancho de pulso del pulso rectangular y el número de muestras a tomar. Todos estos parámetros podrán ser modificados por el operador a través de *spinners*, apareciendo siempre el valor correspondiente de cada parámetro en su parte inferior, tal y como se. Observa en la figura 3-28.

Controles

ancho de pulso:

3

▲▼

Número de pulsos:

3

▲▼

Figura 3-28 Interfaz del radar. Transformada de Fourier. Panel de controles.

4 RESULTADOS / VALIDACIÓN / PRUEBA

4.1 Resultados obtenidos

Tal y como se indica en el título de este capítulo, a continuación, se presentan y analizan los resultados obtenidos mediante la interfaz desarrollada para la simulación del radar pulsado. En particular, se estudia el efecto que producen las variaciones de los distintos parámetros del sistema sobre las representaciones gráficas generadas. Estos parámetros pueden ser modificados por el usuario a través de diferentes mecanismos de control implementados en la interfaz, como deslizadores (*sliders*), selectores incrementales (*spinners*) o mediante la introducción manual de valores numéricos. El análisis se centra en observar cómo dichos ajustes influyen sobre las señales radar tanto en el dominio temporal como en el dominio frecuencial, proporcionando una herramienta visual e interactiva para la comprensión de los principios teóricos previamente expuestos.

4.1.1 Interfaz Teorema de Nyquist

En esta primera ventana de la interfaz, tal y como se ha detallado previamente a lo largo del desarrollo de esta memoria, se presenta una representación gráfica de una señal reconstruida a partir de un conjunto de muestras discretas. Conforme establece el Teorema de Nyquist, la frecuencia de muestreo utilizada para dicha reconstrucción debe ser, como mínimo, el doble de la frecuencia de la señal original emitida por el radar. Solo bajo esta condición es posible garantizar una reconstrucción precisa de la señal continua a partir de sus muestras.

Inicialmente, el código genera una interfaz en la que el usuario puede modificar dos parámetros principales: el factor de multiplicación aplicado a la frecuencia de la señal y el número de periodos representados. Los valores por defecto establecidos para estos parámetros son los siguientes: el factor de frecuencia se fija inicialmente en 2, lo que garantiza el cumplimiento del criterio de Nyquist, y el número de periodos se establece en 5. Con estos valores iniciales, la interfaz muestra por defecto los resultados representados en la Figura 4-1.

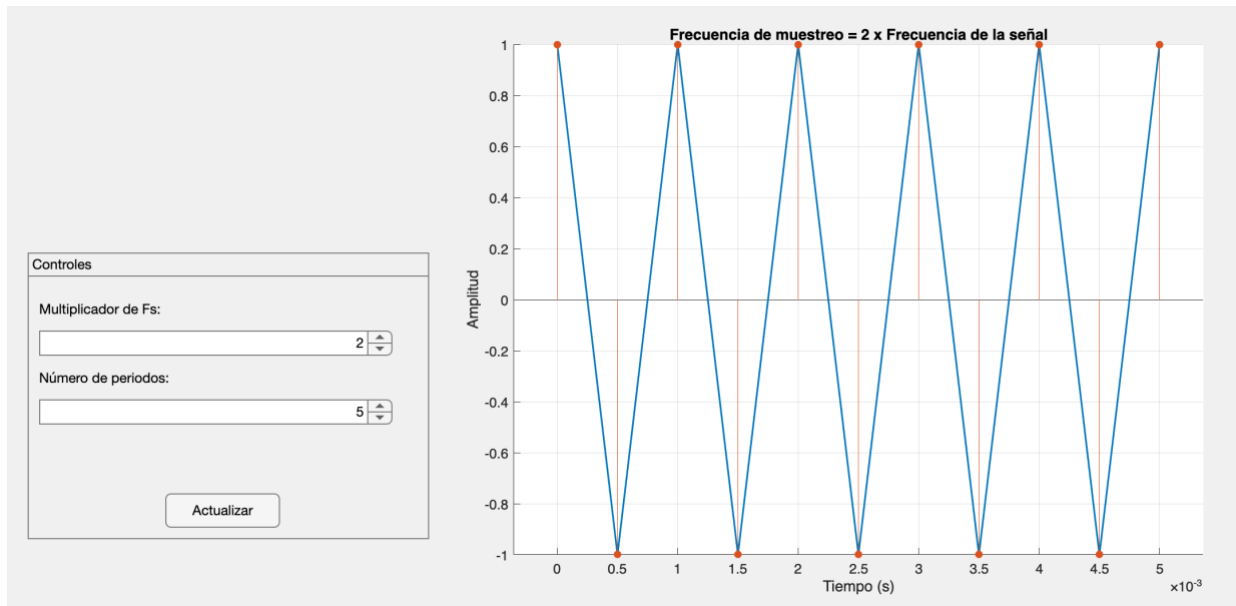


Figura 4-1 Interfaz de Nyquist de partida

No obstante, si se modifica el factor de multiplicación aplicado a la frecuencia de la señal reduciéndolo hasta alcanzar el valor de la unidad, se observa que la reconstrucción de la señal original se vuelve inviable. Esto se debe a que, en dicho caso, la frecuencia de muestreo resulta igual a la frecuencia de la señal, lo que incumple el criterio establecido por el Teorema de Nyquist. En consecuencia, la señal no puede ser correctamente reconstruida a partir de sus muestras como se muestra en la figura 4-2.

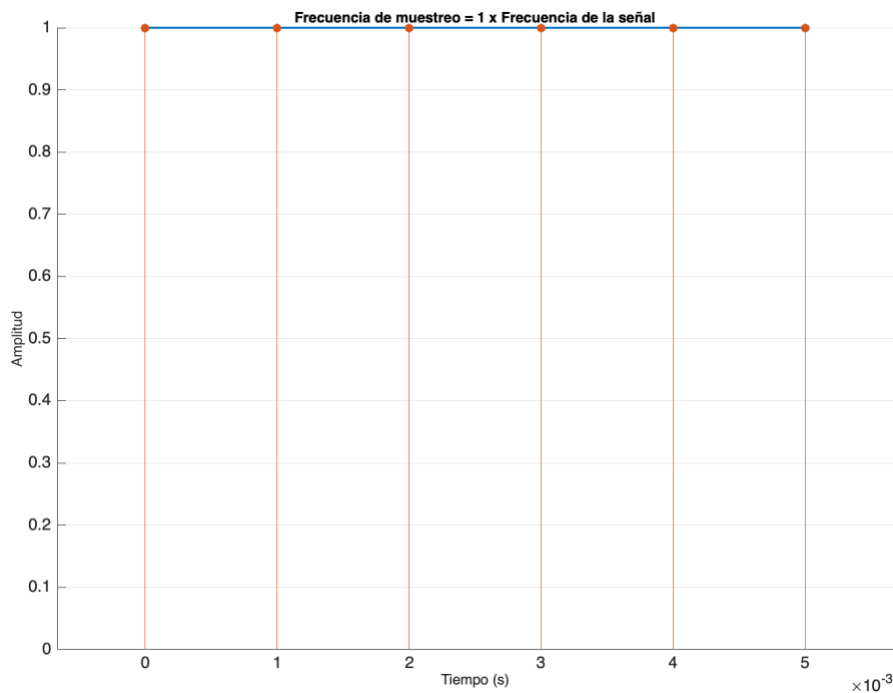


Figura 4-2 Frecuencia de muestreo = Frecuencia de la señal

Por otro lado, se observa que al incrementar de forma significativa el valor del factor de multiplicación aplicado a la frecuencia de la señal, se mejora sustancialmente la capacidad de muestreo del sistema. Este aumento garantiza que, en caso de que existieran variaciones relevantes entre muestras consecutivas —como las que produciría el movimiento de un blanco—, dichas variaciones podrían ser adecuadamente captadas, preservando la información contenida en la señal original.

Sin embargo, en el contexto de la presente simulación, el objetivo no es modelar el comportamiento dinámico de blancos móviles, sino ilustrar el cumplimiento del Teorema de Nyquist. Por tanto, el único efecto observable al incrementar este factor es el aumento del número de muestras utilizadas para la reconstrucción, lo cual permite visualizar con mayor detalle la forma de la señal, validando así la correcta aplicación del criterio de muestreo como se muestra en la figura 4.3.

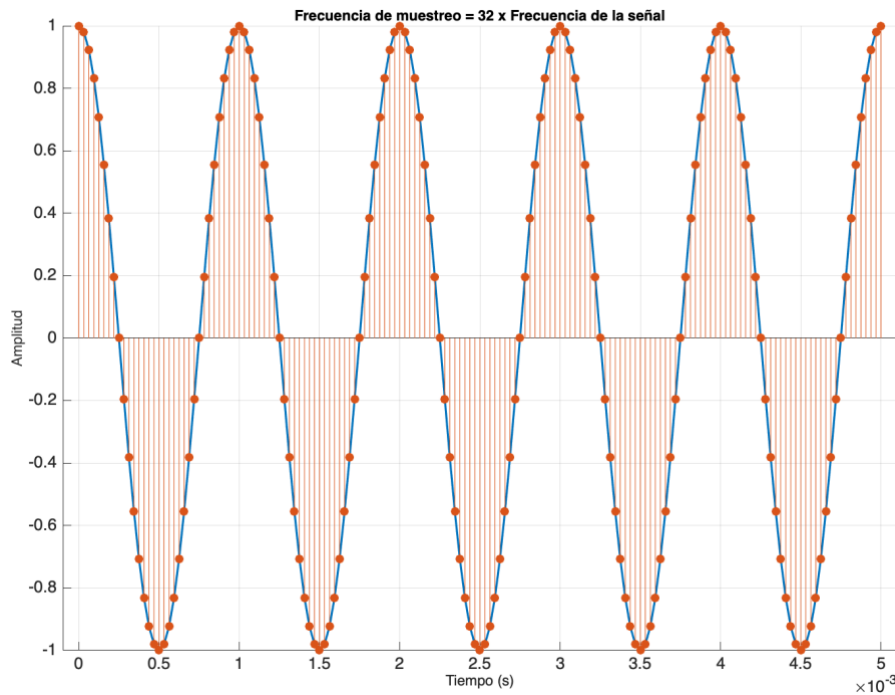


Figura 4-3 Frecuencia de muestreo = 32 x Frecuencia de la señal

Por el contrario, si el valor que se varía es el número de periodos se verá como en el mismo intervalo de tiempo, se lanza un mayor número de pulsos, siendo el resultado el mostrado en la figura 4-4 donde el periodo de muestreo aumenta, tomando el doble del valor inicial.

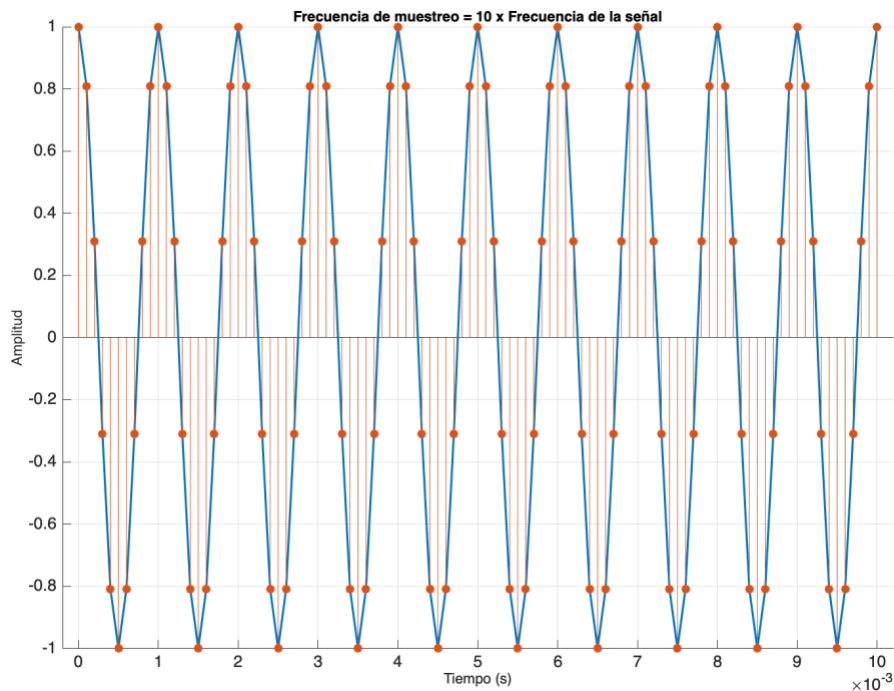


Figura 4-4 Periodo de muestreo = 10

4.1.2 Interfaz Velocidad máxima no ambigua

En la segunda ventana de la interfaz desarrollada para el radar pulsado permite al usuario interactuar con la frecuencia normalizada de la señal recibida procedente de un blanco en movimiento. Esta representación gráfica tiene como objetivo ilustrar cómo varía la información espectral recibida en función de determinados parámetros físicos, los cuales pueden ser ajustados manualmente por el operador para analizar su influencia en el resultado final.

Los parámetros configurables en esta sección incluyen: la velocidad del blanco (expresada en metros por segundo), la frecuencia de repetición de pulsos (PRF, en Hercios), y la frecuencia portadora de la señal (en hercios), todos ellos definidos dentro del Sistema Internacional de Unidades. Los valores iniciales establecidos por defecto para estos parámetros son: una velocidad de 25 m/s, una PRF de 100 Hz y una frecuencia portadora de 3×10^8 Hz. Con esta configuración de partida, el gráfico generado por la interfaz corresponde al que se muestra en la Figura 4-5.

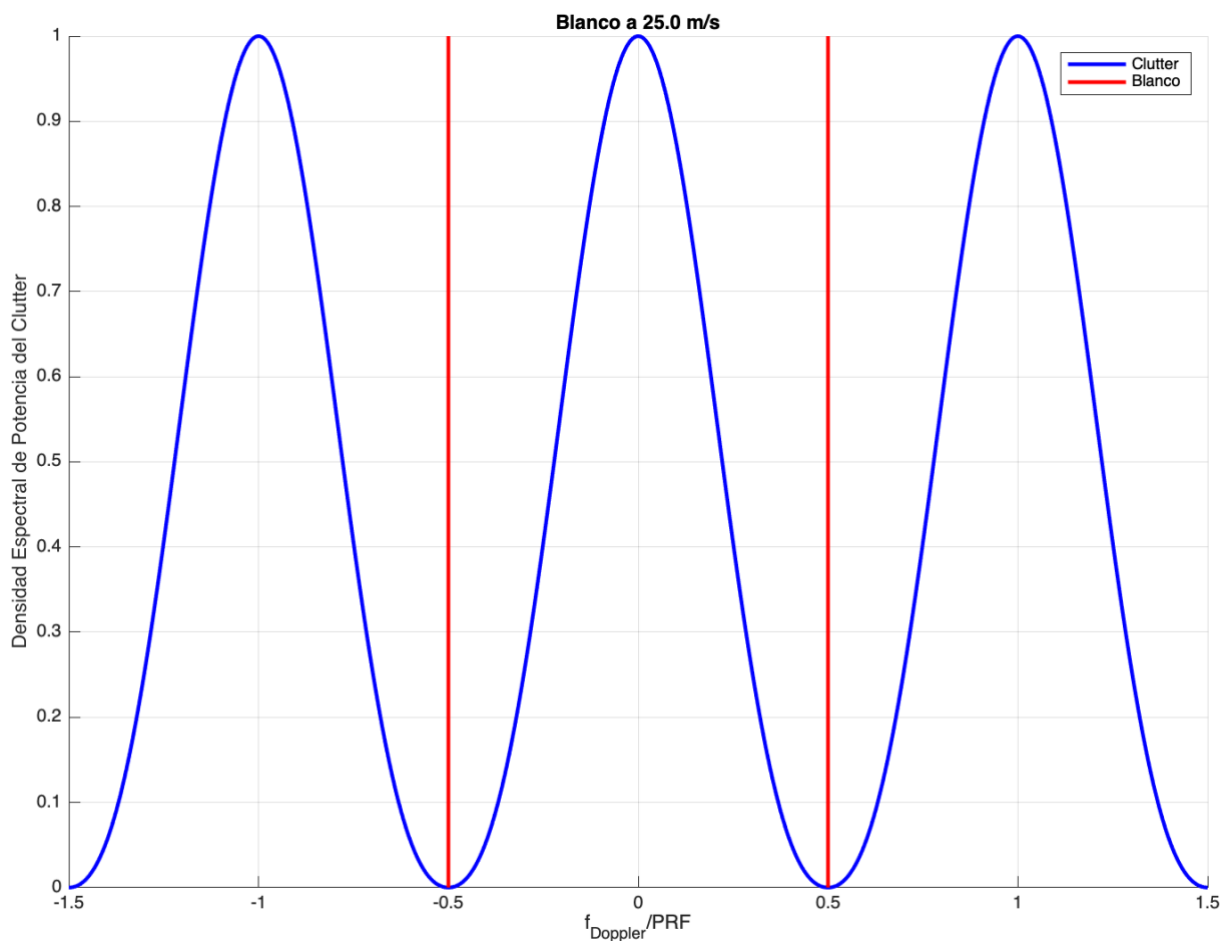


Figura 4-5 Señal recibida con los datos de partida

No obstante, se observa que, con los parámetros establecidos inicialmente, cuando la velocidad del blanco supera los 50 m/s, el sistema radar comienza a presentar limitaciones en la correcta detección del mismo. En este caso, la señal reflejada experimenta un reposicionamiento espectral debido a la superación del umbral de velocidad máxima no ambigua, lo que provoca que el blanco sea representado dentro del espectro de frecuencias en una posición que da lugar a ambigüedades. Esta ambigüedad en la estimación de la velocidad radial se ejemplifica en la Figura 4-6, correspondiente a una simulación en la que la velocidad del blanco ha sido incrementada a 80 m/s, manteniéndose constantes los valores del resto de parámetros.

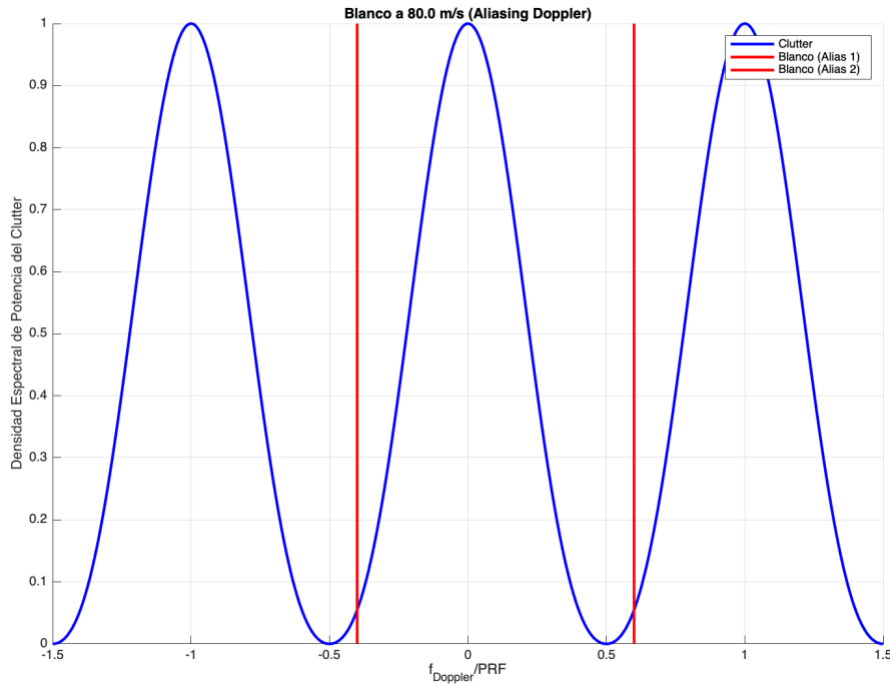


Figura 4-6 Blanco a 80m/s. PRF y frecuencia de la señal valores iniciales.

Este problema, sin embargo, puede mitigarse mediante el ajuste adecuado de los otros dos parámetros fundamentales del sistema: la tasa de repetición de pulsos (PRF) y la frecuencia portadora de la señal. Según se deduce de la ecuación (3-2), el incremento de la PRF o la disminución de la frecuencia de la señal permite ampliar el rango de velocidades no ambiguas, desplazando el umbral a partir del cual se produce el fenómeno de *aliasing* Doppler. En términos prácticos, esto implica que el radar será capaz de detectar correctamente blancos que se desplacen a mayores velocidades sin incurrir en ambigüedades espectrales. Tal y como se muestra en la Figura 4-7, al incrementar la frecuencia de repetición de pulsos (PRF) a un valor de 200 Hz, mientras se mantienen constantes tanto la frecuencia portadora inicial como la velocidad del blanco en 80 m/s, se restablece la correcta identificación espectral del blanco.

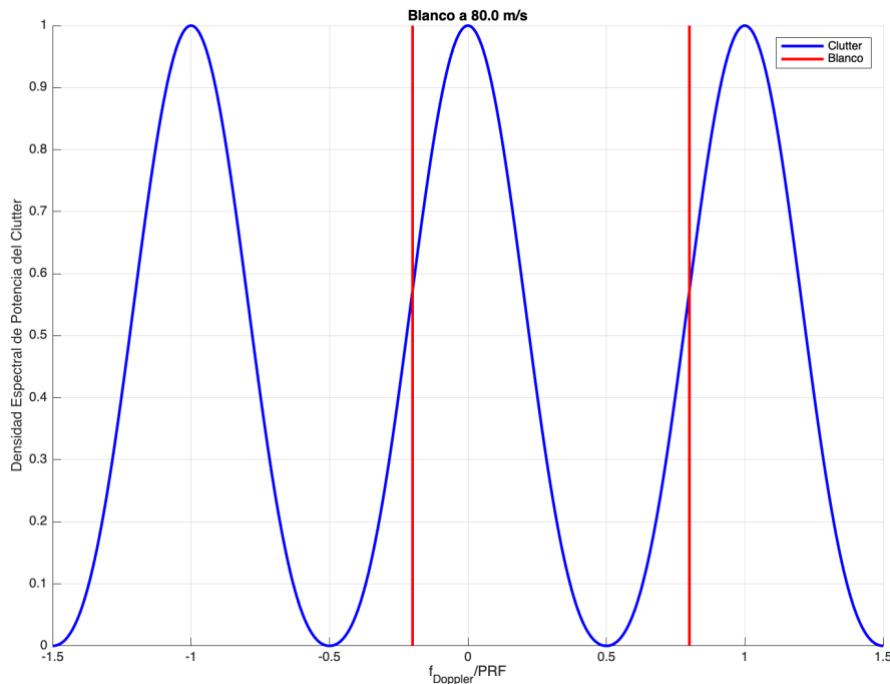


Figura 4-7 Velocidad del blanco = 80m/s, PRF = 200Hz, Frecuencia de la señal no varía respecto al principio

No obstante, al trasladar este análisis al contexto operativo real, debe considerarse que existe un límite físico para la velocidad que puede alcanzar un blanco de superficie. Superado cierto umbral, que en la mayoría de los casos no es sobrepasado por plataformas marítimas convencionales, no resulta estrictamente necesario continuar ajustando los parámetros mencionados, ya que el sistema será capaz de operar dentro de sus márgenes sin comprometer la fiabilidad de la detección.

Para minimizar la ambigüedad de un radar pulsado, es común el uso del escalonamiento de la PRF (*PRF Staggering*). Esta técnica consiste en variar de forma ligera la PRF de un pulso a otro o entre grupos de pulsos en vez de mantenerla constante, de tal forma que se consigue aumentar el rango inequívoco y el Doppler y minimizar los puntos ciegos. [39]

4.1.3 Interfaz Transformada de Fourier

Finalmente, en la última ventana de la interfaz correspondiente al radar pulsado se incorpora una simulación interactiva basada en la aplicación de la Transformada de Fourier. Esta herramienta permite al usuario modificar los dos parámetros mencionados en el apartado 3.4.1. A medida que se modifican estos valores, se actualizan de forma simultánea las representaciones gráficas tanto en el dominio temporal como en el dominio frecuencial, permitiendo observar de forma directa cómo afectan dichos parámetros a la estructura espectral de la señal.

La simulación se inicia con los siguientes valores predeterminados: Frecuencia de muestreo de 1000Hz (valor que no se podrá modificar), ancho de pulso de 3s y se transmiten tres pulsos. Tomando estos valores, las gráficas generadas serían las mostradas en las figuras 4-8 y 4-9.

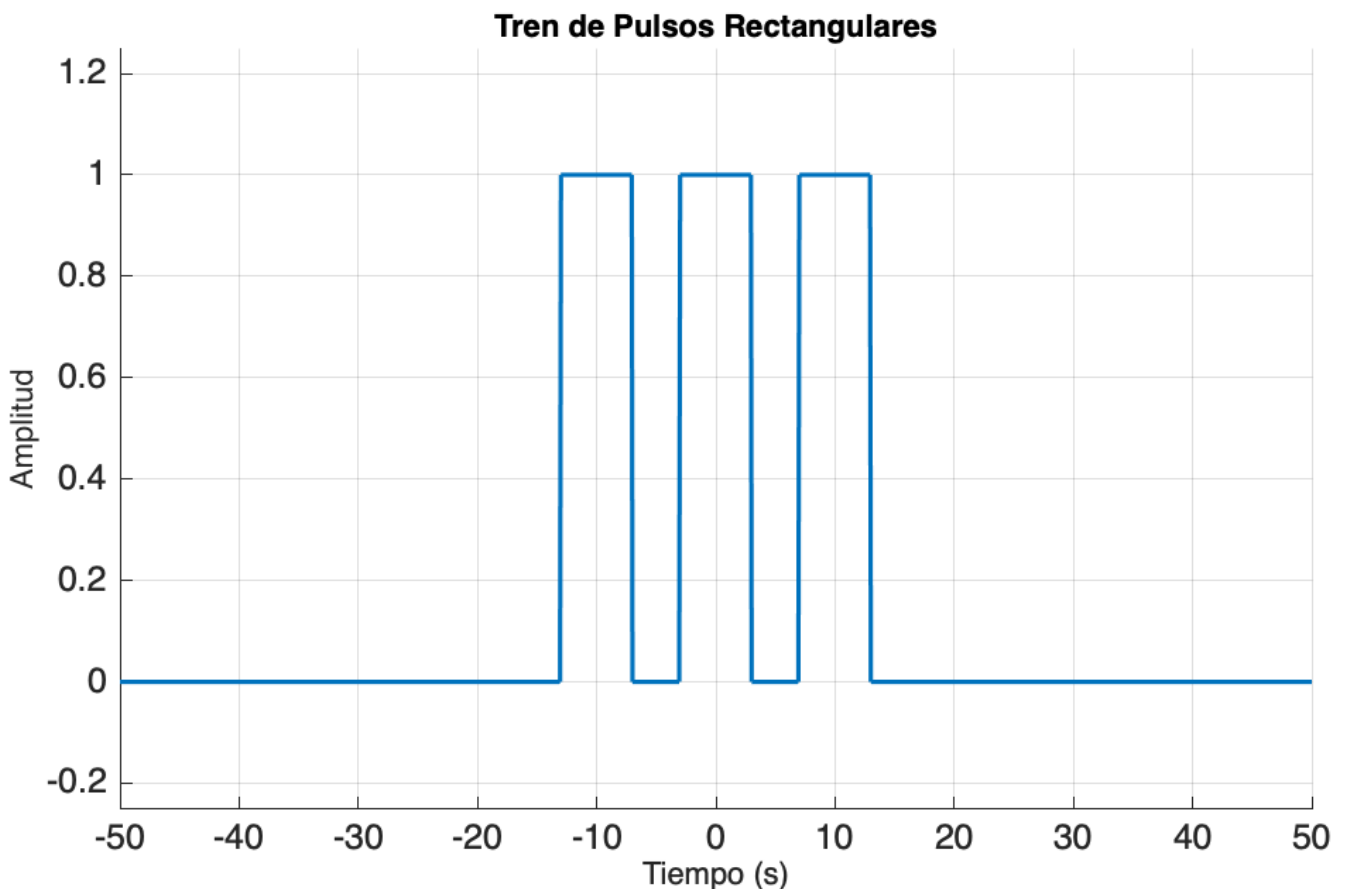


Figura 4-8 Pulso en el dominio del tiempo. Valores iniciales.

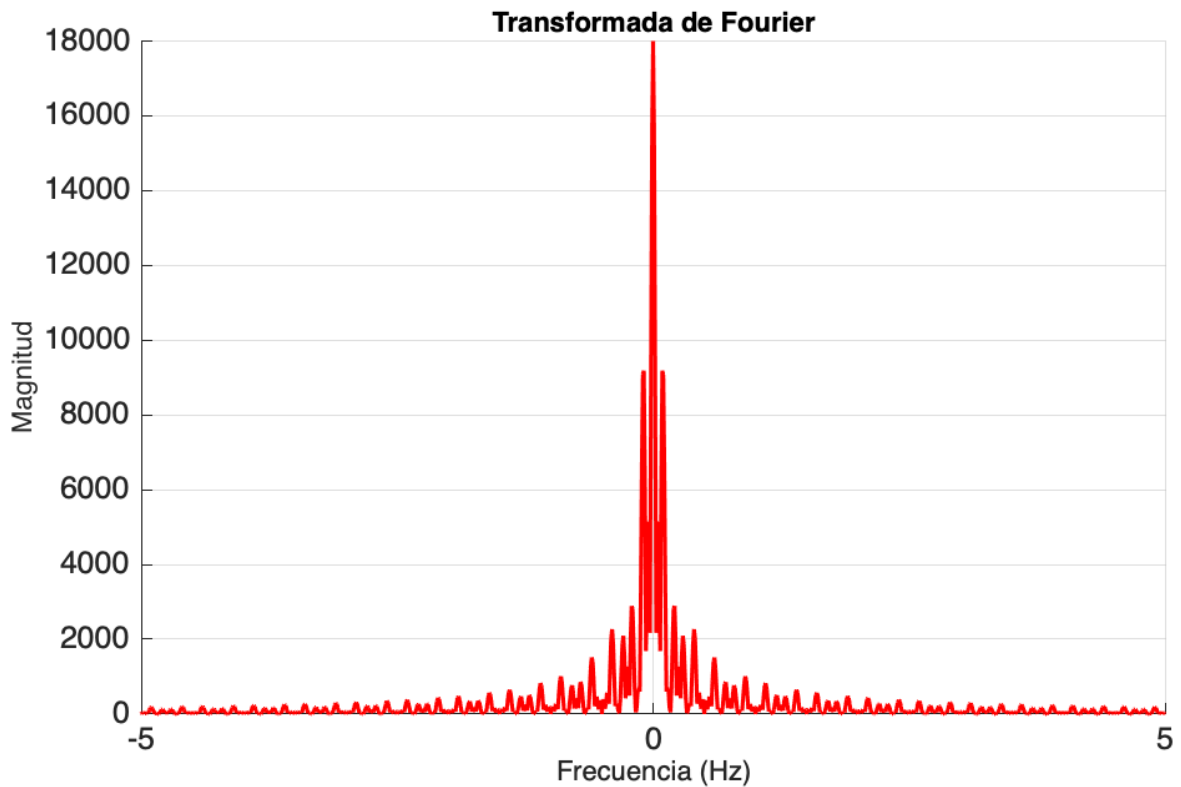


Figura 4-9 Pulso en el dominio frecuencial. Valores iniciales.

Ahora bien, si aumentamos el número de pulsos a cinco, en el gráfico de tiempo podemos apreciar como aparecen cinco pulsos en pantalla. Por otro lado, en el dominio de frecuencia este cambio supone un aumento de la amplitud en frecuencia. Ambas graficas se muestran en las figuras 4-10 y 4-11.

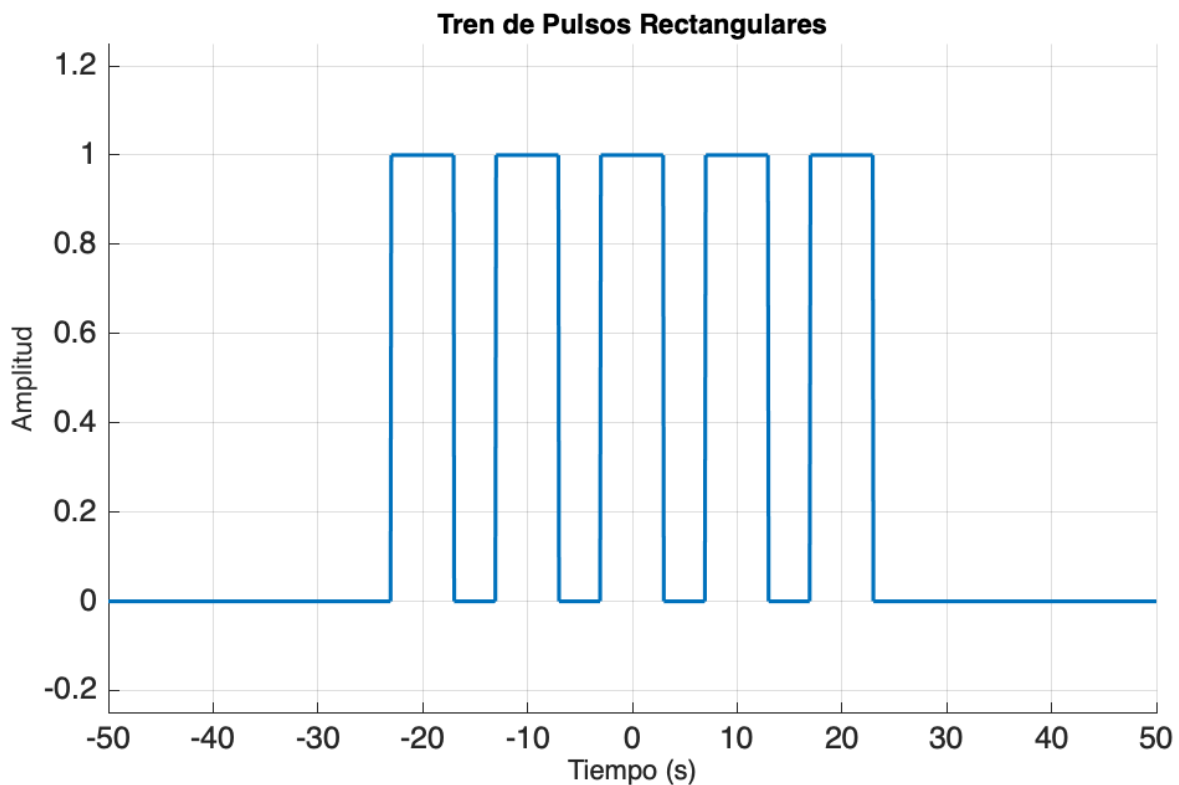


Figura 4-10 Pulso en el dominio del tiempo. N.º de pulsos = 5, ancho de pulso = 3s.

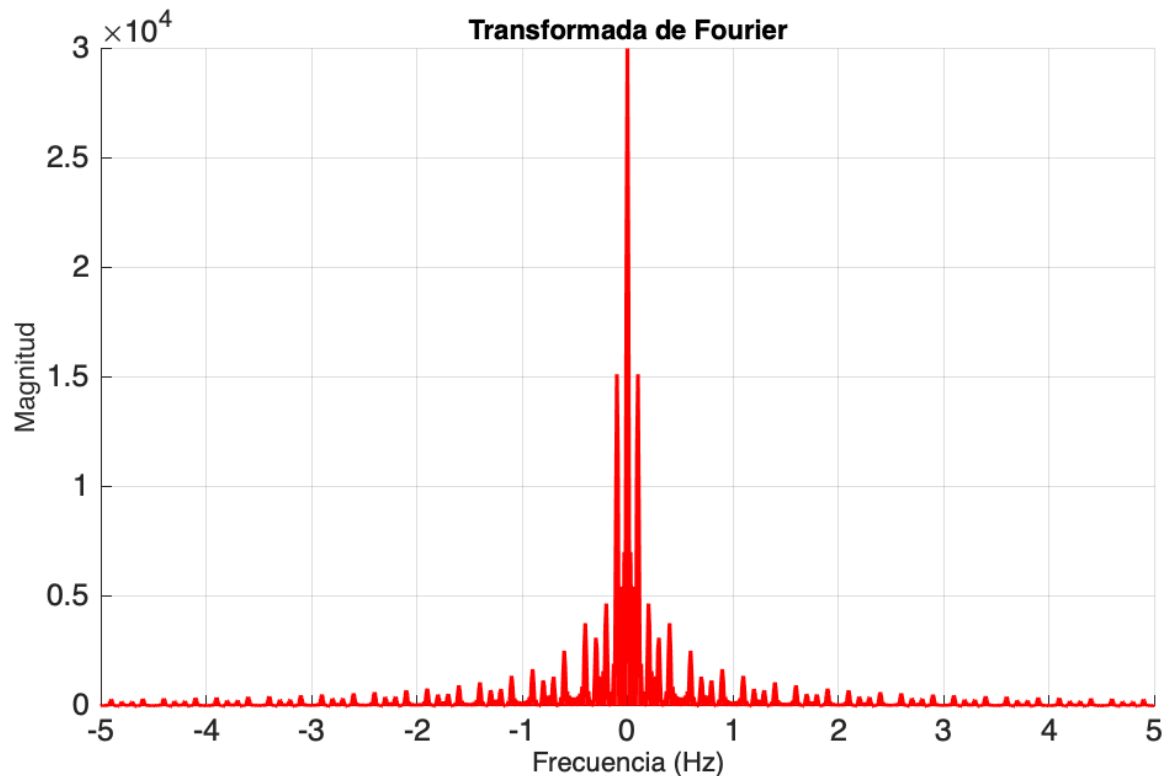


Figura 4-11 Pulso en el dominio frecuencial. N.º de pulsos = 5, ancho de pulso = 3s.

Si en vez de variar el número de pulsos transmitidos, se modificase el ancho de pulso de la señal, haciendo este mayor, se podrá apreciar una concatenación más próxima de los pulsos emitidos en el dominio del tiempo y un valor superior de la magnitud en el dominio frecuencial siendo los resultados los mostrados en las figuras 4-12 y 4-13.

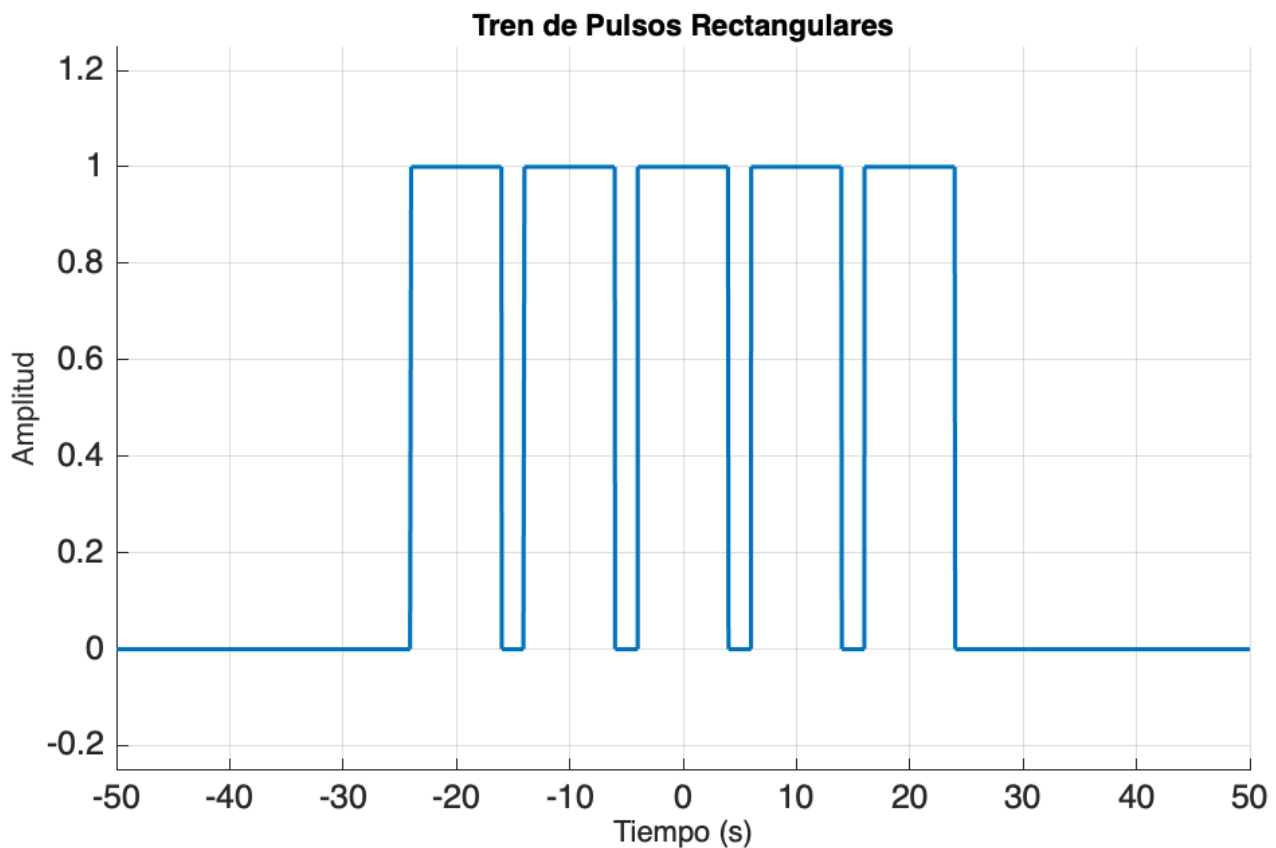


Figura 4-12 Pulso en el dominio del tiempo. N.º de pulsos = 5, ancho de pulso = 4s.

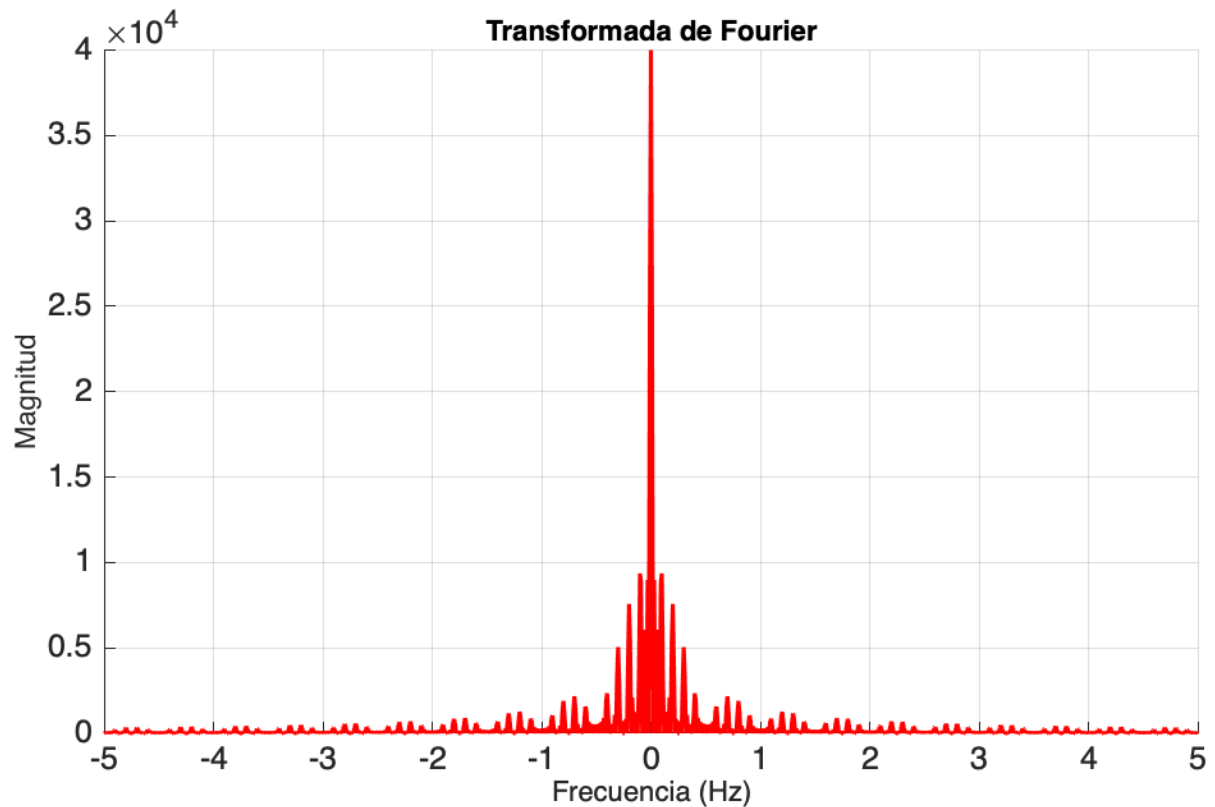


Figura 4-13 Pulso en el dominio frecuencial. N.º de pulsos = 5, ancho de pulso = 4s.

En conclusión, el análisis de los gráficos precedentes permite inferir que un incremento en el ancho del pulso de la señal transmitida conlleva una reducción en el ancho de banda del espectro de frecuencia, aunque con una mayor concentración de energía en las componentes principales. En contraste, una disminución del ancho de pulso produce un ensanchamiento espectral con una distribución más dispersa de la energía.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Tal y como se indica en el título de este apartado, en esta sección se presentan las conclusiones derivadas del desarrollo del presente proyecto, con el propósito de evaluar el grado de cumplimiento de los objetivos establecidos en su fase inicial.

Del mismo modo, y en función de los logros alcanzados, los hitos técnicos superados y la proyección potencial del trabajo realizado, se plantean posibles líneas de desarrollo futuro. Estas futuras líneas de trabajo contemplan tanto la ampliación de las funcionalidades implementadas como la exploración de nuevas aplicaciones, con el fin de optimizar el rendimiento de la herramienta propuesta o extender su utilidad a otros contextos tecnológicos relevantes, especialmente dentro del ámbito de la defensa y la ingeniería de sistemas radar.

5.1 Evaluación de los objetivos

Desde el inicio del presente Trabajo de Fin de Grado, se ha perseguido como objetivo fundamental ofrecer una explicación progresiva y estructurada del funcionamiento de un radar, partiendo desde sus principios físicos y operativos más básicos hasta alcanzar conceptos técnicos de mayor complejidad. Esta aproximación secuencial permite al lector adquirir una base sólida de conocimientos, facilitando así la comprensión de los procedimientos posteriores desarrollados en el proyecto y garantizando una asimilación coherente del contenido.

Una vez establecidos los fundamentos teóricos necesarios, surgió la necesidad de trasladar dichos conocimientos a un entorno digital que permitiese trabajar de forma práctica con señales radar. En este contexto, el reto principal consistía en encontrar una metodología adecuada para transformar una señal continua en el tiempo en su equivalente discreta en el dominio de la frecuencia. Este proceso debía realizarse aplicando los principios previamente explicados, como la discretización de la señal, la función delta de Dirac y el uso de la Transformada de Fourier, con el objetivo de poder analizar los ecos de radar desde una perspectiva espectral.

Tras definir el marco teórico y metodológico, el siguiente paso fue implementar todos estos conceptos en un entorno de simulación computacional. Para ello, se desarrolló un conjunto de códigos en Matlab capaces de modelar el comportamiento de un radar pulsado y generar representaciones gráficas que ilustran los distintos fenómenos tratados a lo largo del trabajo, como el Teorema de Nyquist, la velocidad máxima no ambigua y la Transformada de Fourier.

Finalmente, se diseñó e implementó una interfaz gráfica en Matlab orientada al usuario, mediante la cual es posible modificar los principales parámetros del radar y de los blancos móviles considerados en cada caso. Esta interfaz permite interactuar de manera didáctica con el sistema, facilitando la aplicación práctica de la teoría abordada durante el desarrollo del trabajo y fomentando así una comprensión más profunda de los conceptos fundamentales del análisis espectral en radares pulsados.

Una parte significativa de los objetivos planteados en las etapas iniciales del desarrollo del presente proyecto ha sido alcanzada satisfactoriamente. No obstante, ciertos aspectos permanecen pendientes de implementación. Entre las propuestas no materializadas se encuentra el diseño de una interfaz que integre distintas estrategias de mitigación de ambigüedades en distancia y velocidad de los blancos, tales como la técnica de *PRF staggering* o la aplicación de filtros MTI (*Moving Target Indicator*) para la supresión de *clutter*. Estas funcionalidades se consideran líneas de trabajo futuras susceptibles de ser abordadas en desarrollos posteriores.

5.2 Líneas futuras

En este último apartado se presentan posibles líneas de desarrollo futuro que podrían dar continuidad a la investigación iniciada en el presente trabajo. Estas líneas buscan profundizar y ampliar la capacidad de simulación mediante la escritura de nuevos códigos que permitan implementar funcionalidades adicionales. Entre las posibles mejoras destacan la incorporación de técnicas avanzadas como la integración de pulsos, la compresión de pulsos en frecuencia mediante modulación lineal en frecuencia (LFM), así como la compresión de pulsos en fase. Estas técnicas, ampliamente utilizadas en sistemas radar modernos, permitirían enriquecer la simulación y acercarla aún más al funcionamiento real de sistemas de alta resolución.

Asimismo, se plantea como línea futura el desarrollo de un módulo independiente que permita la simulación de radares de onda continua (*Continuous Wave*). Esta ampliación supondría la implementación de un nuevo código que contemple los principios operativos específicos de este tipo de radar, incluyendo su capacidad para medir velocidad de blancos y su capacidad para discriminarlos. El objetivo sería dotar al operador de una nueva herramienta interactiva con la que pueda modificar los parámetros característicos del radar CW, observar su respuesta espectral en un diagrama de frecuencias, y comprender su funcionamiento en contraste con los radares pulsados.

Finalmente, una proyección integradora consistiría en combinar ambos entornos de simulación — radar pulsado y radar de onda continua— en una única interfaz ampliada y mejorada. Esta plataforma unificada tendría como finalidad convertirse en una herramienta docente avanzada, lo suficientemente completa como para servir de base para prácticas de laboratorio dirigidas a los alumnos de la Escuela Naval Militar. Bajo la supervisión y coordinación del profesorado del Centro Universitario de la Defensa, esta interfaz podría facilitar la enseñanza aplicada de conceptos clave en el ámbito de los sistemas radar, promoviendo un aprendizaje activo y contextualizado en el entorno operativo real tanto del ámbito civil como de la Armada.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Trabajo Final - Leyes de Maxwell respecto al funcionamiento de un radar - 1 1 EL RADAR RESPECTO A - Studocu». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.studocu.com/co/document/universidad-de-san-buenaventura/fundamentos-de-derecho-publico/trabajo-final-leyes-de-maxwell-respecto-al-funcionamiento-de-un-radar/32977622>
- [2] «HERTZ, Heinrich Rudolf». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://forohistorico.coit.es/index.php/personajes/personajes-internacionales/item/hertz>
- [3] «XV. HERTZ. ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/112/htm/sec_17.htm
- [4] «jparkers.pdf». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://revistamarina.cl/revistas/2000/1/jparkers.pdf>
- [5] «Marconi, ingeniero de la primera transmisión por radio de la historia», Historia National Geographic. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://historia.nationalgeographic.com.es/a/marconi-y-primer-transmision-por-radio-historia_14204
- [6] «Christian Hülsmeyer ¿padre del radar?», Un poco de ciencia, por favor. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://unpocodecienciaporfavor.com/2023/01/19/christian-hulsmeyer-padre-del-radar/>
- [7] «WATSON-WATT, Robert». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://forohistorico.coit.es/index.php/personajes/personajes-internacionales/item/robertwattson-watt>
- [8] «Diez años y veinte días - Librerías Nobel.es». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.libreriasnobel.es/es/libros/diez-anos-y-veinte-dias_ALO0040308
- [9] «Instituto de Magnetismo Aplicado (IMA)». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ucm.es/ima/campos-electromagneticos-y-efectos-biologicos>
- [10] <https://www.areatecnologia.com>, «ondas electromagneticas». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.areatecnologia.com/ondas-electromagneticas.htm#Qu%C3%A9_son_las_Ondas_Electromagn%C3%A9ticas
- [11] «propagacion.pdf». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/27/27199/propagacion.pdf>

- [12] «Dispersión Electromagnética: Teoría y Ejemplos Prácticos», StudySmarter ES. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieria-electrica/dispersion-electromagnetica/>
- [13] «Reflexión y Refracción de Ondas». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.fisicalab.com/apartado/reflexion-refraccion-ondas>
- [14] embed, «Tumblr», Tumblr te permite expresarte libremente, descubrir cosas que no sabías sobre ti y conocer a otras personas que comparten tus gustos. Aquí, tus intereses te acercan a gente con la que tienes mucho en común. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://embed.tumblr.com/widgets/share/button?canonicalUrl=https%3A%2F%2Fpiziadas.com%2F2012%2F12%2Findice-de-refraccion.html&postcontent%5Btitle%5D=%C3%8Dndice%20de%20refracci%C3%B3n&postcontent%5Bcontent%5D=https%3A%2F%2Fpiziadas.com%2F2012%2F12%2Findice-de-refraccion.html>
- [15] J. L. Martínez, «PRORED - La reflexión en las ondas y radioenlaces», PRORED. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.prored.es/la-reflexion-en-las-ondas-y-radioenlaces/>
- [16] «Atenuación y Absorción en el Movimiento Ondulatorio». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.fisicalab.com/apartado/amortiguacion>
- [17] «Evaluación y explotación de firma radar». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.inta.es/INTA/va/servicios/95e523d0-14da-11eb-bb2f-ed22714883d2/>
- [18] «content.pdf». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorioinstitucional.uabc.mx/server/api/core/bitstreams/aaf87344-890a-458e-8eb1-90e4a0abc533/content>
- [19] «EL RADAR // Componentes del radar». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://elradar.50webs.com/componentes.htm>
- [20] D.-I. (FH) C. Wolff, «Fundamentos de radar - Diagrama de bloques universal de un radar de pulsos». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/rb67.es.html>
- [21] «El Radar | Instituto de Navegación». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.isndf.com.ar/el-radar/>
- [22] «Principios básicos de Modulación digital». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.tecnologia-informatica.es/Modulacion-Digital/>
- [23] J. L. Alonso Cerpa, «Introducción a los sistemas de radar y ARPA», 2015, Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/6842>
- [24] «Fundamentos de radar - Duplexor». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/an50.es.html>
- [25] «7.Capítulo+6.pdf». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11959/fichero/7.Cap%C3%ADtulo+6.pdf>
- [26] «Parámetros del movimiento ondulatorio – Cienciadelux». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cienciadelux.wordpress.com/2016/03/09/parametros-del-movimiento-ondulatorio/>
- [27] A. Asturias, «Movimiento ondulatorio Ondas armónicas».
- [28] «3-6e5164fc98-skolnik-m.i.---introduction-to-radar-systems-mgh-(2000)-(1)(1).pdf».

- Accedido: 22 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://lecturenotes-classroom-assignment-and-submission.s3.ap-south-1.amazonaws.com/3-6e5164fc98-skolnik-m.i.---introduction-to-radar-systems-mgh-%282000%29-%281%29%281%29.pdf>
- [29] «Diagrama de radiación», Antenas. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://todoantenas.weebly.com/diagrama-de-radiacioacuten.html>
- [30] «Principios básicos de antenas». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.tecnologia-informatica.es/principios-basicos-de-antenas/>
- [31] D.-I. (FH) C. Wolff, «Fundamentos de radar - Ancho de haz». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/an08.es.html>
- [32] «G. Richard Curry - Radar Essentials - 2012 | PDF | Transmitter | Antenna (Radio)». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/228940019/G-Richard-Curry-Radar-Essentials-2012>
- [33] D.-I. (FH) C. Wolff, «Fundamentos de radar - Radar pulsado». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.radartutorial.eu/02.basics/rp05.es.html>
- [34] C. B. Ruiz y J. de, «APLICACIÓN PRÁCTICA TRANSCÉPTOR BGT24MTR11: RADAR DOPPLER».
- [35] J. C. Benavidez, «Tecnología AESA: La evolución de los radares», Zona Militar. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.zona-militar.com/2021/04/28/aesa-la-evolucion-de-los-radares/>
- [36] «The DFT “à Pied”: Mastering The Fourier Transform in One Day | Stephan Bernsee’s Blog». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://blogs.zynaptiq.com/bernsee/dft-a-pied/>
- [37] «Transformada de Fourier». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/simbolico/fourier/fourier_1.html
- [38] «frec_Nyquist.pdf». Accedido: 23 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: http://carina.fcaglp.unlp.edu.ar/senales/apuntes/frec_Nyquist.pdf
- [39] N. Levanon, «Combining PRF staggering with phase-coded inter-pulse overlay to combat delay-Doppler ambiguities», *IET Radar Sonar Navig.*, vol. 14, n.º 9, pp. 1436-1440, 2020, doi: 10.1049/iet-rsn.2020.0153.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El presente estudio tiene como objetivo analizar el uso de técnicas de análisis espectral aplicadas a la detección de blancos móviles en sistemas radar pulsado, con especial atención a sus implicaciones sociales, económicas y medioambientales en un contexto de desarrollo tecnológico orientado a la defensa y la vigilancia.

La implementación de este tipo de técnicas permitiría mejorar significativamente las capacidades de detección y seguimiento de objetivos en movimiento, lo cual resulta esencial en escenarios como la vigilancia costera, el control del espacio aéreo o la monitorización de áreas sensibles. Esto supondría una mejora sustancial en la seguridad ciudadana y en la eficacia operativa de unidades tanto civiles como militares. Asimismo, permitiría optimizar la respuesta ante situaciones de emergencia, como catástrofes naturales o labores de búsqueda y rescate, incrementando con ello las posibilidades de éxito en la localización de personas u objetos en entornos complejos.

Desde una perspectiva económica, el perfeccionamiento de los algoritmos de análisis espectral contribuiría a aumentar la eficiencia de los sistemas radar, reduciendo errores y, por tanto, costes asociados al mantenimiento, la operación o el despliegue innecesario de recursos. Además, el impulso de nuevas soluciones tecnológicas en este ámbito puede suponer una oportunidad para el crecimiento de sectores estratégicos como el aeroespacial, la industria de defensa o el ámbito de la seguridad, fomentando la innovación nacional y la creación de empleo cualificado.

En lo que respecta al medio ambiente, aunque el impacto directo de los algoritmos de análisis espectral es reducido, su aplicación en sistemas de vigilancia y protección ambiental puede ayudar a la detección temprana de actividades ilegales como la pesca furtiva, la tala indiscriminada o el tráfico no autorizado de embarcaciones, favoreciendo así la conservación de ecosistemas vulnerables. Por otro lado, una mayor precisión en la operación de radares podría traducirse en un uso más racional de la energía y una menor huella tecnológica en el medio plazo.

Por último, el desarrollo y aplicación de este tipo de soluciones tecnológicas por parte de instituciones públicas o de las Fuerzas Armadas podría contribuir a reforzar la percepción social de su compromiso con la seguridad, la eficiencia y la sostenibilidad en el ejercicio de sus funciones.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

Desde una perspectiva ética y social, el desarrollo de tecnologías avanzadas para la detección y seguimiento de blancos móviles plantea una serie de consideraciones que deben ser tenidas en cuenta en todas las fases del proceso, desde la investigación hasta su implementación operativa. La posibilidad de disponer de sistemas de vigilancia más precisos y eficaces conlleva, inevitablemente, un debate sobre los límites entre seguridad y privacidad, especialmente cuando estas tecnologías pueden ser aplicadas en contextos civiles.

La utilización de radares para la monitorización de movimientos en espacios públicos o fronterizos debe garantizar, en todo momento, el respeto a los derechos fundamentales de las personas, en especial el derecho a la intimidad y a la protección de datos. Es imprescindible que el uso de estas tecnologías esté sujeto a una regulación clara, transparente y proporcional, que delimite su uso legítimo y evite potenciales abusos o usos indebidos que puedan derivar en prácticas de vigilancia masiva no justificadas.

En el ámbito militar, si bien el uso de estos sistemas se justifica por la necesidad de garantizar la defensa nacional y la seguridad de los ciudadanos, no debe obviarse el potencial impacto que pueden tener en situaciones de conflicto. La mejora en la capacidad de detección y localización de objetivos podría traducirse en operaciones más selectivas y precisas, lo que contribuiría a reducir daños colaterales y preservar vidas humanas. No obstante, también plantea el riesgo de una escalada en la sofisticación de los sistemas de combate, con las implicaciones éticas que ello conlleva.

Del mismo modo, la progresiva incorporación de inteligencia artificial y algoritmos de procesamiento avanzado en sistemas de defensa abre nuevos interrogantes sobre la delegación de decisiones críticas a máquinas, especialmente en contextos donde puedan estar en juego vidas humanas. En este sentido, resulta esencial que el desarrollo de estas tecnologías se acompañe de un marco ético sólido, que garantice la supervisión humana y la rendición de cuentas en todo momento.

Por último, cabe destacar que el fomento de una cultura tecnológica responsable y al servicio del bien común puede tener un impacto positivo en la percepción social de la innovación en defensa y seguridad. La investigación en este campo, si se orienta hacia la mejora de la seguridad colectiva sin vulnerar derechos fundamentales, puede contribuir a generar confianza en la sociedad y a consolidar una visión más ética y equilibrada del progreso tecnológico.

ANEXO III: CÓDIGO DE LA INTERFAZ RADAR

A continuación, se dejará el código empleado para el desarrollo de la interfaz generada a través de Matlab.

1. Teorema de Nyquist y velocidad máxima no ambigua

```
function radar_pulsado_DEFINITIVO
    % Función principal que inicia el flujo de la aplicación.
    pantallaInicial;
end

function pantallaInicial
    % Crea la figura para el ingreso de datos
    fig = uifigure('Name', 'Datos de Usuario', 'Position', [500 500 400 300]);

    % Etiqueta y desplegable para elegir el Grupo (números del 1 al 6)
    uilabel(fig, 'Text', 'Grupo:', 'Position', [50, 220, 100, 22], 'FontSize', 12);
    grupoDropdown = uidropdown(fig, 'Items', {'1','2','3','4','5','6'}, ...
        'Position', [150, 220, 200, 22], 'FontSize', 12);

    % Etiqueta y cuadro de texto para Número
    uilabel(fig, 'Text', 'Número:', 'Position', [50, 180, 100, 22], 'FontSize', 12);
    numeroField = uieditfield(fig, 'text', 'Position', [150, 180, 200, 22], 'FontSize', 12);

    % Etiqueta y desplegable para seleccionar entre CGA o IM
    uilabel(fig, 'Text', 'Cuerpo:', 'Position', [50, 140, 100, 22], 'FontSize', 12);
    opcionDropdown = uidropdown(fig, 'Items', {'CGA', 'IM'}, ...
        'Position', [150, 140, 200, 22], 'FontSize', 12);

    % Botón Continuar para pasar a la interfaz del radar pulsado
    uibutton(fig, 'Text', 'Continuar', 'Position', [150, 60, 100, 30], ...
        'ButtonPushedFcn', @(btn,event) continuarCallback(grupoDropdown.Value, numeroField.Value,
opcionDropdown.Value, fig));
end

function continuarCallback(grupo, numero, opcion, fig)
    % Validar que todos los campos tengan datos
    if isempty(strtrim(grupo)) || isempty(strtrim(numero)) || isempty(strtrim(opcion))
```

```
        uialert(fig, 'Todos los campos son obligatorios.', 'Error');
    else
        disp(['Grupo: ', grupo, ', Número: ', numero, ', Cuerpo: ', opcion]);
        close(fig); % Cierra la ventana de ingreso
        interfaz(grupo, numero, opcion); % Abre la interfaz principal
    end
end

function interfaz(grupo, numero, opcion)

    % Crear la figura principal de la interfaz
    fig = uifigure('Name','Interfaz Radar','Position',[100 100 1100 700]);

    % Panel de encabezado con los datos del usuario
    headerPanel = uipanel(fig, 'Position', [10 660 1080 40], 'BorderType', 'line');
    uilabel(headerPanel, 'Text', sprintf('Grupo: %s Número: %s Cuerpo: %s', grupo, numero, opcion), ...
        'Position', [10 10 1060 20], 'FontSize', 12, 'HorizontalAlignment', 'center');

    % Grupo de pestañas
    tg = uitabgroup(fig, 'Position', [10 10 1080 640]);

    %% Tab 2: Teorema de Nyquist
    tab2 = uitab(tg, 'Title', 'Nyquist');
    ctrlPanel2 = uipanel(tab2, 'Title', 'Controles', 'Position', [20 150 350 250]);
    uilabel(ctrlPanel2, 'Text', 'Multiplicador de Fs:', 'Position', [10 190 200 22]);
    FsMultSpinner = uispinner(ctrlPanel2, 'Limits', [1 100], 'Value', 2, ...
        'Step', 1, 'Position', [10 160 310 22]);
    uilabel(ctrlPanel2, 'Text', 'Número de periodos:', 'Position', [10 130 200 22]);
    periodsSpinner = uispinner(ctrlPanel2, 'Limits', [1 100], 'Value', 5, ...
        'Step', 1, 'Position', [10 100 310 22]);
    uibutton(ctrlPanel2, 'Text', 'Actualizar', ...
        'Position', [120, 10, 100, 30], ...
        'ButtonPushedFcn', @(btn,event) updateTab2());
    ax2 = uiaxes(tab2, 'Position', [400 100 650 500]);
    title(ax2, 'Teorema de Nyquist');

function updateTab2()
```

```

f_sig = 1000;
A = 1;
mult = FsMultSpinner.Value;
Fs = mult * f_sig;
periods = periodsSpinner.Value;
t = 0:1/Fs:periods*(1/f_sig);
s = A * cos(2*pi*f_sig*t);
plot(ax2, t, s, 'LineWidth', 1.5);
hold(ax2, 'on');
stem(ax2, t, s, 'filled');
hold(ax2, 'off');
xlabel(ax2, 'Tiempo (s)');
ylabel(ax2, 'Amplitud');
title(ax2, sprintf('Frecuencia de muestreo = %d x Frecuencia de la señal', mult));
grid(ax2, 'on');
end
updateTab2();

%% Tab 3: Velocidad máxima no ambigua
tab3 = uitab(tg, 'Title', 'Velocidad máxima no ambigua');
ctrlPanel3 = uipanel(tab3, 'Title', 'Controles', 'Position', [20 150 350 250]);
uilabel(ctrlPanel3, 'Text', 'Velocidad del blanco (m/s):', 'Position', [10, 205, 200, 22]);
vSpinner = uispinner(ctrlPanel3, 'Limits', [0 150], 'Value', 25, ...
    'Step', 1, 'Position', [10, 185, 310, 22]);
uilabel(ctrlPanel3, 'Text', 'PRF (Hz):', 'Position', [10, 150, 200, 22]);
prfSpinner = uispinner(ctrlPanel3, 'Limits', [50 1000], 'Value', 100, ...
    'Step', 1, 'Position', [10, 130, 310, 22]);
uilabel(ctrlPanel3, 'Text', 'Frecuencia de la señal (Hz):', 'Position', [10, 95, 200, 22]);
fSpinner = uispinner(ctrlPanel3, 'Limits', [1e7, 1e10], 'Value', 3e8, ...
    'Step', 1e7, 'Position', [10, 75, 310, 22]);
uibutton(ctrlPanel3, 'Text', 'Actualizar', ...
    'Position', [120, 30, 100, 30], ...
    'ButtonPushedFcn', @(btn,event) updateTab3());
formulaPanel = uipanel(tab3, 'Position', [20 400 350 130], 'BorderType', 'line');
uilabel(formulaPanel, 'Text', 'v = (PRF·lambda)/2', ...
    'Position', [10 40 330 50], 'FontSize', 12, 'HorizontalAlignment', 'center');

```

```
ax3 = uiaxes(tab3, 'Position', [400 100 650 500]);
```

```
title(ax3, 'Densidad Espectral del Clutter');
```

```
function updateTab3()
```

```
    % Valores de entrada
```

```
    v_target = vSpinner.Value;
```

```
    PRF = prfSpinner.Value;
```

```
    f_signal = fSpinner.Value;
```

```
    f_range = 1.5; % Rango fijo para la frecuencia normalizada
```

```
    c = 3e8;
```

```
    lambda = c / f_signal; % Calcula  $\lambda$ 
```

```
    % Frecuencia Doppler real del blanco (Hz)
```

```
    f_target = 2 * v_target / lambda;
```

```
    f_target_norm_true = f_target / PRF;
```

```
    % Velocidad umbral (v_threshold)
```

```
    v_threshold = (PRF * lambda) / 2;
```

```
    if v_target <= v_threshold
```

```
        aliasing_flag = false;
```

```
        f_target_norm1 = f_target_norm_true;
```

```
        f_target_norm2 = f_target_norm_true - 1;
```

```
    else
```

```
        aliasing_flag = true;
```

```
        % Se calculan ambas posiciones para el aliasing:
```

```
        f_target_norm1 = f_target_norm_true - 2;
```

```
        f_target_norm2 = f_target_norm_true - 1;
```

```
    end
```

```
    % Configura eje de frecuencia normalizada
```

```
    f_norm = linspace(-f_range, f_range, 2000);
```

```
    BW_replica = 1;
```

```
    f_mod = mod(f_norm + BW_replica/2, BW_replica) - BW_replica/2;
```

```
    arg = f_mod / (BW_replica/2);
```

```
    S_base = ones(size(arg));
```

```
    idx = abs(arg) > 1e-8;
```

```
S_base(idx) = ( sin(pi * arg(idx)) ./ (pi * arg(idx)) ).^2;
```

```
% Grafica la densidad espectral del clutter
```

```
plot(ax3, f_norm, S_base, 'b', 'LineWidth', 2);
```

```
hold(ax3, 'on');
```

```
% Se plotean ambas líneas rojas correspondientes a los alias
```

```
plot(ax3, [f_target_norm1 f_target_norm1], [0, 1], 'r', 'LineWidth', 2);
```

```
plot(ax3, [f_target_norm2 f_target_norm2], [0, 1], 'r', 'LineWidth', 2);
```

```
hold(ax3, 'off');
```

```
xlabel(ax3, 'f_{Doppler}/PRF');
```

```
ylabel(ax3, 'Densidad Espectral de Potencia del Clutter');
```

```
if aliasing_flag
```

```
    title(ax3, sprintf('Blanco a %.1f m/s (Aliasing Doppler)', v_target));
```

```
    legend(ax3, 'Clutter', 'Blanco (Alias 1)', 'Blanco (Alias 2)');
```

```
else
```

```
    title(ax3, sprintf('Blanco a %.1f m/s', v_target));
```

```
    legend(ax3, 'Clutter', 'Blanco', 'Blanco');
```

```
end
```

```
grid(ax3, 'on');
```

```
xticks(ax3, -f_range:0.5:f_range);
```

```
end
```

```
updateTab3();
```

```
end
```

2. Transformada de Fourier

```
function FOURIER_DEF
```

```
%% Parámetros fijos
```

```
T_total = 100; % Duración total de la señal (s)
```

```
T0 = 10; % Separación entre pulsos (s)
```

```
fs = 1000; % Frecuencia de muestreo (fija) (Hz)
```

```
%% Valores por defecto
```

```
default_b = 3;      % Valor inicial para b
defaultPulsos = 3; % Valor inicial para número de pulsos

%% Crea la ventana principal
fig = uifigure('Name', 'Tren de Pulsos Rectangulares', 'Position', [100, 100, 900, 700]);

%% Crea el panel de controles
controlPanel = uipanel(fig, 'Title', 'Controles', 'Position', [20, 20, 350, 660]);

% Texto para b y spinner para b
lblB = uilabel(controlPanel, 'Text', 'ancho de pulso:', 'Position', [20, 550, 150, 30], 'FontSize', 12);
spinnerB = uispinner(controlPanel, ...
    'Limits', [1, 5], 'Value', default_b, 'Step', 0.5, ...
    'Position', [20, 510, 150, 30]);

% Texto para "Número de pulsos" y su spinner
lblPulsos = uilabel(controlPanel, 'Text', 'Número de pulsos:', ...
    'Position', [20, 460, 150, 30], 'FontSize', 12);
spinnerPulsos = uispinner(controlPanel, ...
    'Limits', [1, 11], 'Value', defaultPulsos, 'Step', 2, ...
    'Position', [20, 420, 150, 30]);

%% Crea ejes para las gráficas (lado derecho)
% Eje para el dominio del tiempo
ax1 = uiaxes(fig, 'Position', [400, 360, 450, 300]);
title(ax1, 'Tren de Pulsos Rectangulares');
xlabel(ax1, 'Tiempo (s)');
ylabel(ax1, 'Amplitud');

% Eje para la Transformada de Fourier
ax2 = uiaxes(fig, 'Position', [400, 40, 450, 300]);
title(ax2, 'Transformada de Fourier');
xlabel(ax2, 'Frecuencia (Hz)');
ylabel(ax2, 'Magnitud');

%% Asigna callbacks a los spinners
```

```
spinnerB.ValueChangedFcn = @(src, event) updatePlot();
spinnerPulsos.ValueChangedFcn = @(src, event) updatePlot();

%% Llamada inicial para graficar
updatePlot();

%% Función interna para actualizar las gráficas
function updatePlot()
    % Obtener los valores actuales de los spinners
    b_val = spinnerB.Value;
    % Aseguramos que el valor de "Número de pulsos" sea impar
    numPulsos = spinnerPulsos.Value; % Con Step de 2 se obtiene 1,3,5,...

    % Genera el vector de tiempo (con frecuencia de muestreo fija)
    N_samples = fs * T_total;
    t = linspace(-T_total/2, T_total/2, N_samples);

    % Construye el tren de pulsos rectangulares
    pulseTrain = zeros(size(t));
    kmin = -floor(numPulsos/2);
    kmax = floor(numPulsos/2);
    for k = kmin:kmax
        pulseTrain = pulseTrain + double(abs(t - k*T0) <= b_val);
    end

    % Calcula la FFT del tren de pulsos
    N = length(t);
    Y = fftshift(fft(pulseTrain));
    dt = t(2) - t(1);
    f = (-N/2:N/2-1) * (1/(N*dt));

    % Actualiza la gráfica en el dominio del tiempo
    plot(ax1, t, pulseTrain, 'LineWidth', 1.5);
    xlim(ax1, [min(t) max(t)]);
    ylim(ax1, [-0.25 1.25]);
    grid(ax1, 'on');
```

```
% Actualiza la gráfica de la Transformada de Fourier
plot(ax2, f, abs(Y), 'r', 'LineWidth', 1.5);
xlim(ax2, [-5, 5]);
grid(ax2, 'on');
end
end
```