

# Proyecto de Sistemas de Radionavegación y Posicionamiento: **Simulación de un Sistema Radar**

**Grupo:** Miguel Carralero Lanchares y Francisco Orcha Kovacs.

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto desarrolla una simulación en entorno académico de un radar de vigilancia pulsado, inspirado en el sistema AN/MPQ-64 Sentinel. Este radar se caracteriza por su capacidad para detectar blancos móviles mediante impulsos electromagnéticos. La simulación reproduce su funcionamiento básico sin aplicar técnicas avanzadas como compresión de pulsos, integración de ecos o detección adaptativa, y se centra en la detección de múltiples blancos (cinco en total) con trayectorias simples y diferenciadas. Además, se introduce de forma extendida la presencia de blancos fluctuantes, aportando mayor realismo al escenario de detección.

El sistema, implementado en MATLAB, calcula el alcance máximo, simula la señal recibida y realiza la detección comparando con un umbral. Se representan gráficamente los blancos reales, su detección radar y una pantalla tipo A-SCOPE que refleja la intensidad de los ecos en función de la distancia.

## 2. PARÁMETROS DEL SISTEMA RADAR Y CONSTANTES UTILIZADAS

Para definir los parámetros técnicos del sistema radar simulado, se ha utilizado como base el AN/MPQ-64 Sentinel, radar 3D en banda X de uso militar. Las especificaciones fueron obtenidas de documentación oficial del sistema ([https://www.radartutorial.eu/19.kartei/04.battle/pubs/mpq\\_64.pdf](https://www.radartutorial.eu/19.kartei/04.battle/pubs/mpq_64.pdf)), y, cuando fue necesario, complementadas con datos de radares de prestaciones comparables.

Al final del apartado se incluye una tabla resumen con todas las constantes y valores empleados en la simulación.

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
Potencia pico ( $P_{dg}$ )	$10^5$	W	Potencia de transmisión
Ganancia antena ( $G_{ant}$ )	30 dB (1000)	-	Potencia de transmisión
Frecuencia ( $f$ )	9 GHz	Hz	Frecuencia de operación del radar
Ancho de pulso ( $\tau$ )	1 $\mu$ s	s	Duración del pulso transmitido
Pérdidas del sistema ( $L_s$ )	5 dB	-	Atenuaciones varias en el sistema radar
Factor de ruido ( $F_n$ )	4 dB	-	Figura de ruido del receptor
Temperatura del sistema ( $T_0$ )	290	K	Temperatura estándar de ruido

Sección radar media ( $\sigma$ )	1	$m^2$	RCS media del blanco
Prob. falsa alarma ( $P_{fa}$ )	$10^{-6}$	-	Tasa aceptable de falsas detecciones
Prob. Detección ( $P_d$ )	0.9	-	Probabilidad deseada de detección correcta
Ancho de haz antena	3°	grados	Ángulo de cobertura instantáneo del haz

Tabla 1: Resumen de parámetros del proyecto.

### 3. PROCEDIMIENTO IMPLEMENTADO Y FUNDAMENTO TEÓRICO

#### 3.1. Cálculo del Alcance Máximo ( $R_{max}$ )

El primer paso de la simulación consiste en determinar el alcance máximo teórico del radar en condiciones ideales, asumiendo un blanco no fluctuante con una sección radar constante (modelo **Swerling 0**). Para ello, se aplica la ecuación básica del radar monostático:

$$R_{max} = \left( \frac{P_{dg} \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot L \cdot k \cdot T_0 \cdot F_n \cdot B_n \cdot SNR_{min}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Esta expresión considera los efectos de ganancia, frecuencia, atenuaciones, ruido térmico y el umbral de relación señal-ruido mínima para lograr la probabilidad de detección deseada. En esta simulación se ha utilizado el valor medio de sección radar  $\sigma = 1 m^2$  y se ha calculado la SNR mínima requerida en función de la probabilidad de detección ( $P_d = 0.9$ ) y de falsa alarma ( $P_{fa} = 10^{-6}$ ) mediante la función **shnidman**.

#### Resultado de la simulación:

$$R_{max} = 17.11 km$$

Antes de continuar, cabe mencionar que, aunque en la simulación posterior se incorporen blancos fluctuantes con RCS variable, el valor de  $R_{max}$  se calcula aquí sin considerar dicha fluctuación, como punto de partida de diseño. Un análisis más riguroso requeriría el ajuste de  $SNR_{min}$  en función del modelo Swerling seleccionado.

### 3.2. Resolución Mínima y Distancia Mínima:

La resolución en distancia  $R_{res}$  y la distancia mínima de detección  $R_{min}$  están directamente determinadas por el ancho del pulso transmitido, mediante la expresión:

$$R_{res} = R_{min} = \frac{c \cdot \tau}{2}$$

Donde:

- $c = 3 \cdot 10^8$  m/s es la velocidad de la luz
- $\tau = 1 \mu s$  es la duración del pulso

#### Resultado de la simulación:

- Resolución mínima: **149.90 m**
- Distancia mínima: **149.90 m**

### 3.3. Frecuencia de Repetición de Pulsos ( $PRF$ ) y Alcance No Ambiguo

Para evitar ambigüedad de rango, la PRF se selecciona de forma que el alcance máximo cumpla:

$$R_{max} = \frac{3}{4} \cdot R_{max,na} \rightarrow R_{max,na} = \frac{4}{3} \cdot R_{max}$$

A partir de  $R_{max,na}$  se determina el intervalo entre pulsos (PRI) y la frecuencia de repetición (PRF):

$$PRI = \frac{2 \cdot R_{max,na}}{c}, PRF = \frac{1}{PRI}$$

#### Resultado de la simulación:

- Alcance no ambiguo:  $R_{max,na} = 22.81 \text{ km}$
- $PRI = 0.1522 \text{ ms}$
- $PRF = 6571.02 \text{ Hz}$

### 3.4. Sensibilidad del Receptor y Umbral de Detección

Una vez fijada la SNR mínima, se calcula la potencia de ruido media en el receptor:

$$N_{tot} = k \cdot T_0 \cdot F_n \cdot B_n$$

A partir de ahí se obtiene la potencia mínima detectable en la entrada del receptor:

$$S_{min} = SNR_{min} \cdot N_{tot}, P_{rx,min} = S_{min} \cdot L$$

Finalmente, la tensión mínima detectable en envolvente es:

$$V_{rx,min} = \sqrt{S_{min}}$$

El umbral de detección, calculado a partir del modelo de ruido Rayleigh, se expresa como:

$$V_{umbral} = \sqrt{2 \cdot N_{tot} \cdot \ln\left(\frac{1}{P_{fa}}\right)}$$

#### Resultado de la simulación:

- $S_{min} = 2.06 \cdot 10^{-13} W$
- $P_{rx,min} = 6.53 \cdot 10^{-13} W$
- $V_{umbral} = 5.27 \cdot 10^{-7} W$

## 4. SIMULACIÓN DE LOS BLANCOS MÓVILES

La simulación considera **cinco blancos móviles** con posiciones, direcciones y velocidades independientes. Cada blanco es generado con una posición inicial aleatoria en coordenadas polares, garantizando que algunos estén dentro del alcance máximo y otros más allá, permitiendo observar efectos como zona ciega o ambigüedad de rango.

### 4.1. Generación Aleatoria de Posición Inicial

Cada blanco se genera con una posición aleatoria definida en coordenadas polares. El ángulo de entrada se selecciona de forma uniforme en el rango de 0 a  $2\pi$  radianes, y la distancia radial se sitúa entre dos umbrales:

$$R_k(0) \in [R_{min} + 0.3 \cdot R_{max,na}, 1.3 \cdot R_{max,na}]$$

Este rango permite incluir blancos dentro del alcance de detección y también más allá de los límites del radar, permitiendo observar fenómenos como zonas ciegas o ambigüedad de rango.

#### 4.2 Dirección de Movimiento

Una vez generada la posición inicial, la dirección del movimiento se orienta directamente hacia el radar, ubicado en el origen del sistema de coordenadas.

#### 4.3. Velocidad Dependiente de la Distancia

Para asegurar que los blancos que inician a gran distancia tengan tiempo de llegar a zonas de interés, se adapta su velocidad inicial en función de su posición:

- Si el blanco comienza más allá del alcance no ambiguo ( $R_k > R_{max, na}$ ), se le asigna una velocidad alta en el rango de 600 a 900 m/s.
- Si comienza dentro del rango efectivo, su velocidad se ajusta entre 400 y 650 m/s.

Este ajuste nos permite mantener una simulación dinámica, con blancos que cruzan diferentes regiones del espacio radar durante el tiempo simulado.

#### 4.4. Registro de la Trayectoria

Para representar correctamente el movimiento de los blancos, se mantiene un historial de sus posiciones a lo largo del tiempo. Este registro se utiliza posteriormente para visualizar la trayectoria real de cada blanco en la pantalla de “Posición Real” y comparar dicha trayectoria con los ecos detectados por el radar.

## 5. IMPLEMENTACIÓN DE BLANCOS FLUCTUANTES

En el modelo radar simulado, se ha implementado la presencia de blancos fluctuantes con el objetivo de reflejar condiciones más realistas del entorno.

Para modelar esta variabilidad, se ha utilizado una distribución exponencial de primer orden, equivalente al modelo **Swerling tipo I o II**, en el que la sección radar instantánea de cada blanco se genera como una variable aleatoria en cada pulso. Esto introduce fluctuaciones naturales en la potencia del eco recibido, lo que afecta la probabilidad de detección.

Dicha implementación se logra con la siguiente instrucción en nuestro código:

```
RCS_instantanea_k = exprnd(RCS_mean_calc);
```

Esta línea genera un nuevo valor de sección radar en cada iteración del bucle, partiendo del valor medio usado en el diseño. El sistema radar utiliza este valor para calcular la potencia recibida, lo que permite simular de forma sencilla el efecto de blancos no constantes en tiempo real.

## 6. REPRESENTACIÓN GRÁFICA

La visualización del entorno y detección radar se realiza mediante una interfaz compuesta por cuatro pantallas principales. La primera de ellas es la **pantalla de posición real**, ubicada en la esquina superior izquierda. En esta, se representa el espacio físico real donde se sitúan tanto el radar como los blancos móviles. El radar está fijo en el origen, y se visualizan dos círculos concéntricos que representan los radios  $R_{max}$  y  $R_{max,na}$ . La zona comprendida entre estos dos radios se sombrea en amarillo claro para señalar la zona ciega, donde no pueden producirse detecciones válidas. Esta pantalla permite observar con precisión las trayectorias reales de los blancos, su movimiento continuo, y si entran o salen de las zonas de cobertura o ambigüedad. Cabe destacar que no se ha representado gráficamente el radio mínimo ( $R_{min}$ , ya que, al tratarse de un valor de 149.9 m frente al rango máximo de 17.11 km, su visualización resultaría inapreciable en la escala utilizada.

Dado que las posiciones iniciales de los blancos son aleatorias, es posible que alguno de ellos quede situado en la zona superior izquierda, coincidiendo con la ubicación por defecto de la leyenda. En ese caso, esta puede desplazarse manualmente colocando el ratón sobre ella, haciendo clic, y arrastrándola a otra posición.

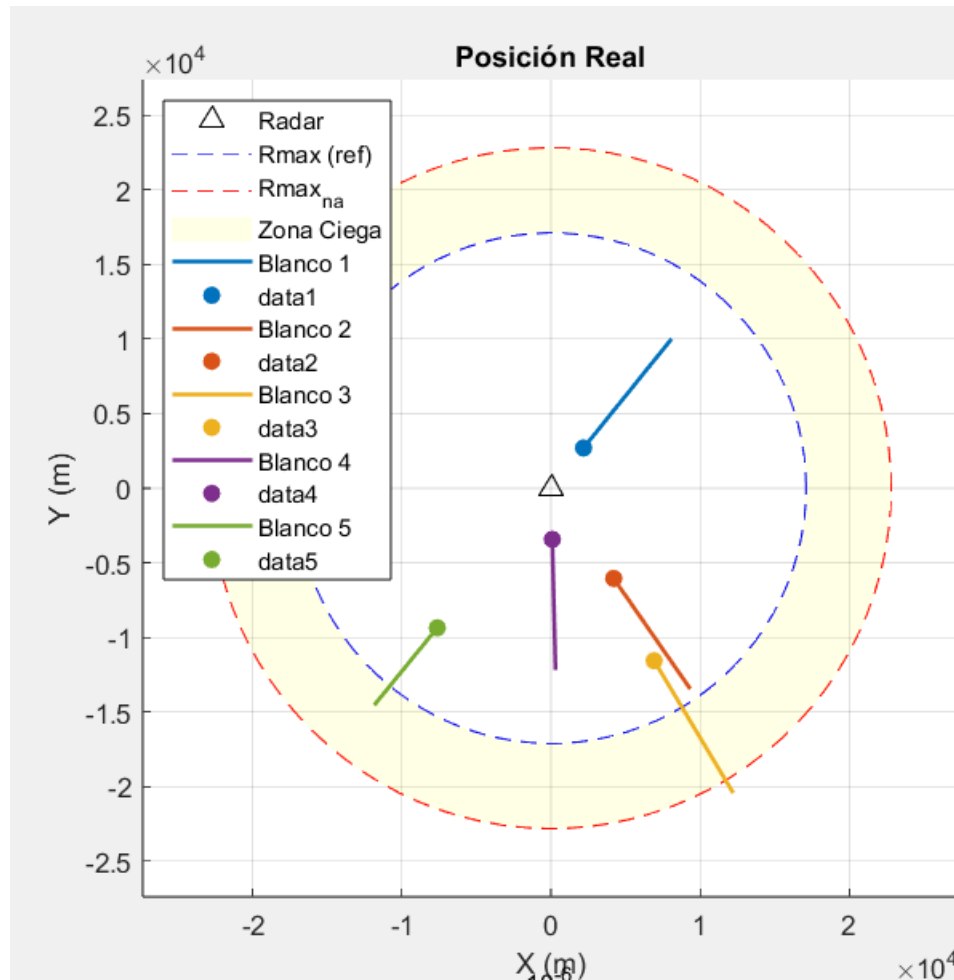


Figura 1: Pantalla de Posición Real.

En segundo lugar, se dispone la **pantalla PPI** (*Plan Position Indicator*), situada a la derecha de la anterior. Esta pantalla adopta una proyección polar y simula cómo "ve" el radar el entorno. En ella se representa el barrido angular de la antena con una línea móvil que rota en sentido horario. Se representan detecciones válidas dentro del rango visible, usando puntos sobre coordenadas polares. La escala radial está calibrada en kilómetros y se ajusta dinámicamente para incluir blancos detectados más allá del  $R_{\max, na}$  si corresponde, aunque estos pueden verse como detecciones ambiguas (con rango aparente reducido). También se muestran los radios de  $R_{\max}$  y  $R_{\max, na}$  para facilitar la interpretación del alcance radar. El color de fondo oscuro y los trazos verdes mejoran el contraste y claridad de los elementos detectados. Cada eco permanece



visible en pantalla únicamente durante 1.5 veces el tiempo de un barrido completo, de modo que se muestra como máximo uno o dos impactos recientes por trayectoria.

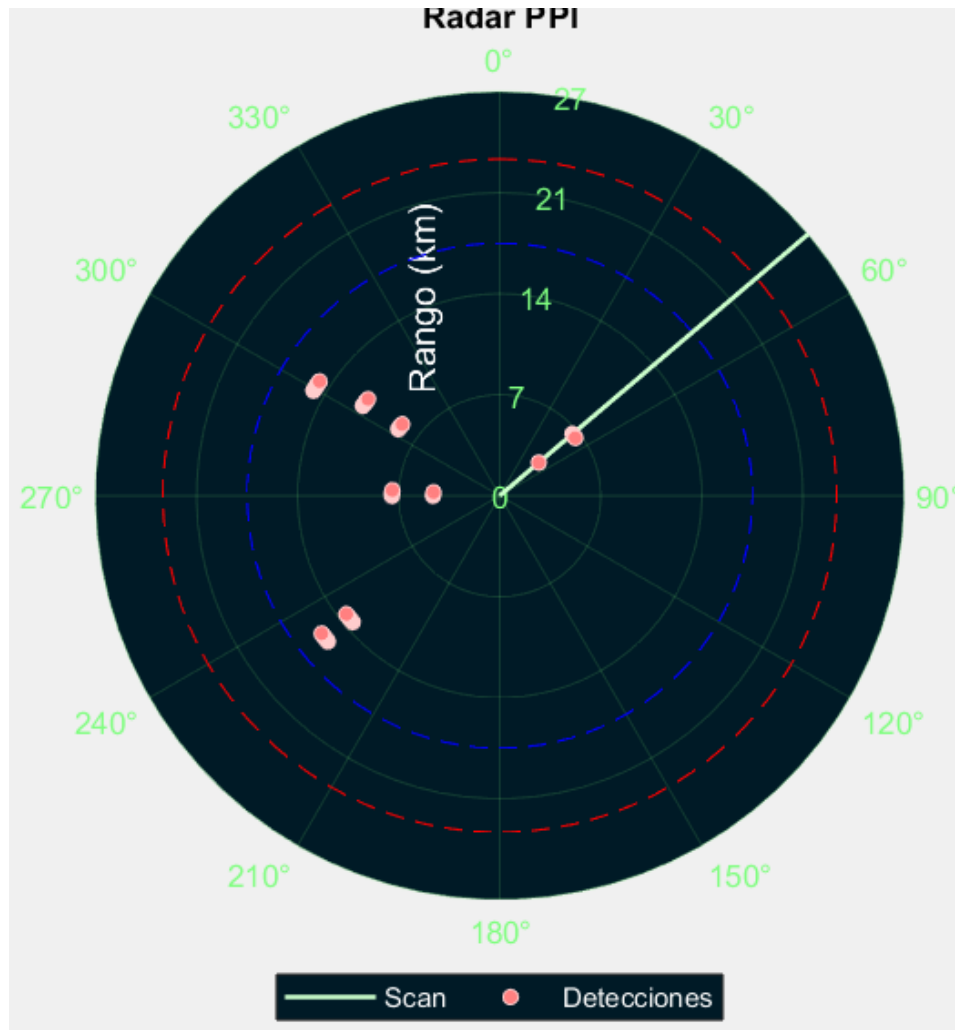


Figura 2: Pantalla PPI.

La tercera vista corresponde al **A-Scope**, ubicada en la parte inferior central. Esta pantalla representa la amplitud de la señal recibida en función de la distancia aparente, expresada en kilómetros. Cada pico indica un eco radar, y se compara en tiempo real con un umbral de detección fijo  $V_{umbral}$  representado como una línea roja discontinua. Solo aquellos ecos que lo superan se consideran detecciones válidas. Esta representación es fundamental para analizar las señales retornadas en cada pulso, permitiendo visualizar también blancos que podrían ser ambiguos (aparentemente cercanos) o que emergen del ruido debido a su sección radar instantáneamente mayor. El A-Scope se actualiza continuamente durante el escaneo, proporcionando una visión directa de la potencia recibida frente a la distancia.

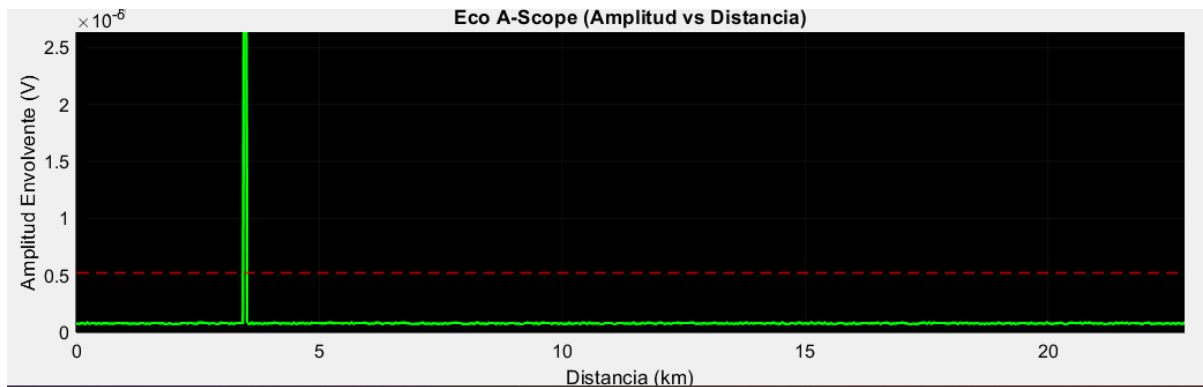


Figura 3: Pantalla Tipo 1: A-Scope.

Finalmente, se incluye una **pantalla completa con todas las representaciones combinadas**, integradas en una única figura con disposición de subplots. Esta configuración permite observar simultáneamente la evolución real de los blancos, la respuesta del radar en modo PPI, y el análisis detallado de las señales en A-Scope. Esta vista global es crucial para verificar el comportamiento del sistema en tiempo real, validar la aparición de blancos ambiguos o desaparecidos por estar en zona ciega, y comprobar la concordancia entre las posiciones reales y las detecciones simuladas. Además, la disposición y dimensionado de las subpantallas está cuidadosamente definida para mantener la proporción, el rango de representación, y una visualización clara y simultánea de todos los elementos relevantes.

Así, cuando se ejecuta el código, se genera esta interfaz gráfica que permite monitorizar todas las pantallas en paralelo, ofreciendo una visión completa del comportamiento del radar y los blancos en un entorno dinámico y representativo.

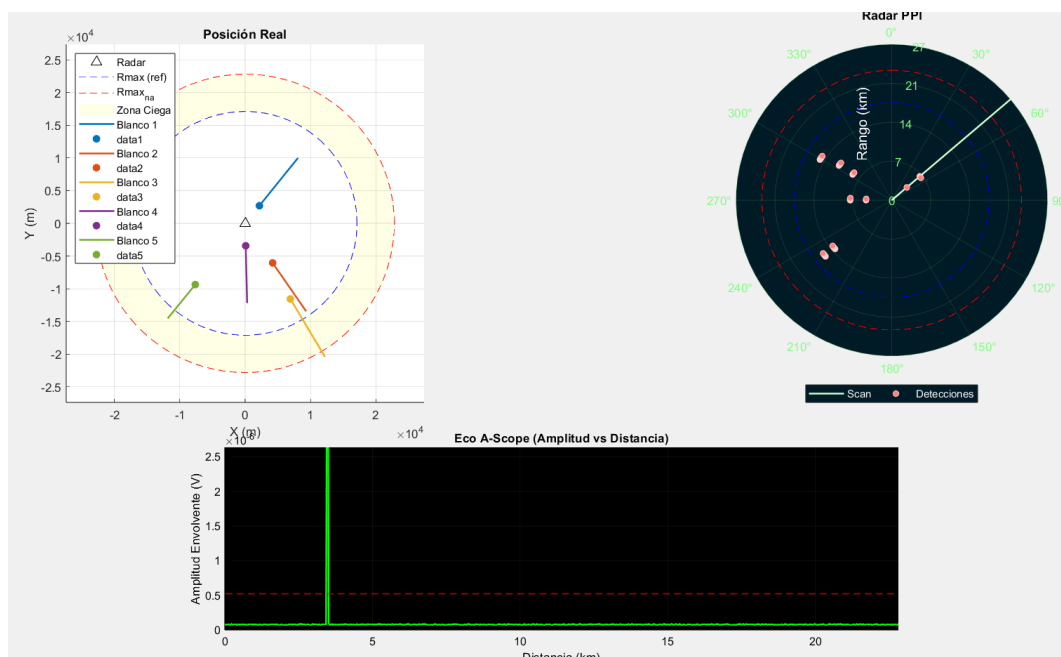


Figura 4: Pantalla completa con las representaciones.

## 8. CASOS DE ESTUDIO Y RESULTADOS DETECCIÓN

A partir de los elementos definidos en los apartados anteriores (cálculo del alcance, blancos móviles, fluctuación del RCS y visualización gráfica), se examina ahora cómo se comporta el sistema radar frente a distintos escenarios de detección. Se analizan situaciones particulares que permiten ilustrar tanto las capacidades como las limitaciones del sistema, haciendo uso de las representaciones PPI, A-Scope y el registro de trayectorias.

Para ello, se ha realizado una simulación con cinco blancos móviles, todos con trayectorias aleatorias pero dirigidas hacia el radar. Las condiciones iniciales de estos blancos son las siguientes:

- Blanco 1:  $R = 27.6$  km, Ángulo =  $313.7^\circ$ , Velocidad = 608.0 m/s
- Blanco 2:  $R = 9.70$  km, Ángulo =  $348.8^\circ$ , Velocidad = 565.1 m/s
- Blanco 3:  $R = 20.2$  km, Ángulo =  $218.4^\circ$ , Velocidad = 578.4 m/s
- Blanco 4:  $R = 21.9$  km, Ángulo =  $208.6^\circ$ , Velocidad = 488.8 m/s
- Blanco 5:  $R = 13.2$  km, Ángulo =  $246.6^\circ$ , Velocidad = 505.3 m/s

A continuación, se presentan distintos casos de uso extraídos de esta simulación, en los que se observa el rendimiento del sistema en términos de detección.

### 8.1. Detección de blancos dentro del rango efectivo

En condiciones ideales, cuando un blanco se encuentra:

- Dentro del haz de exploración angular
- A una distancia mayor que la distancia mínima ( $R_{min}$ )
- Menor que el rango máximo no ambiguo ( $R_{max, na}$ )
- Y no dentro de la zona ciega (entre  $R_{max}$  y  $R_{max, na}$ )

Entonces, si su señal supera el umbral de detección ( $V_{umbral\_absoluto\_envolvente}$ ), el blanco es detectado y visualizado en el radar PPI con su correspondiente ángulo y distancia aparente (modulada por  $R_{max, na}$ ). En el A-Scope, esta detección aparece como un pico en la envolvente, destacando sobre el nivel de ruido. En la figura 5 se puede visualizar un ejemplo de detección de blancos dentro del rango efectivo.

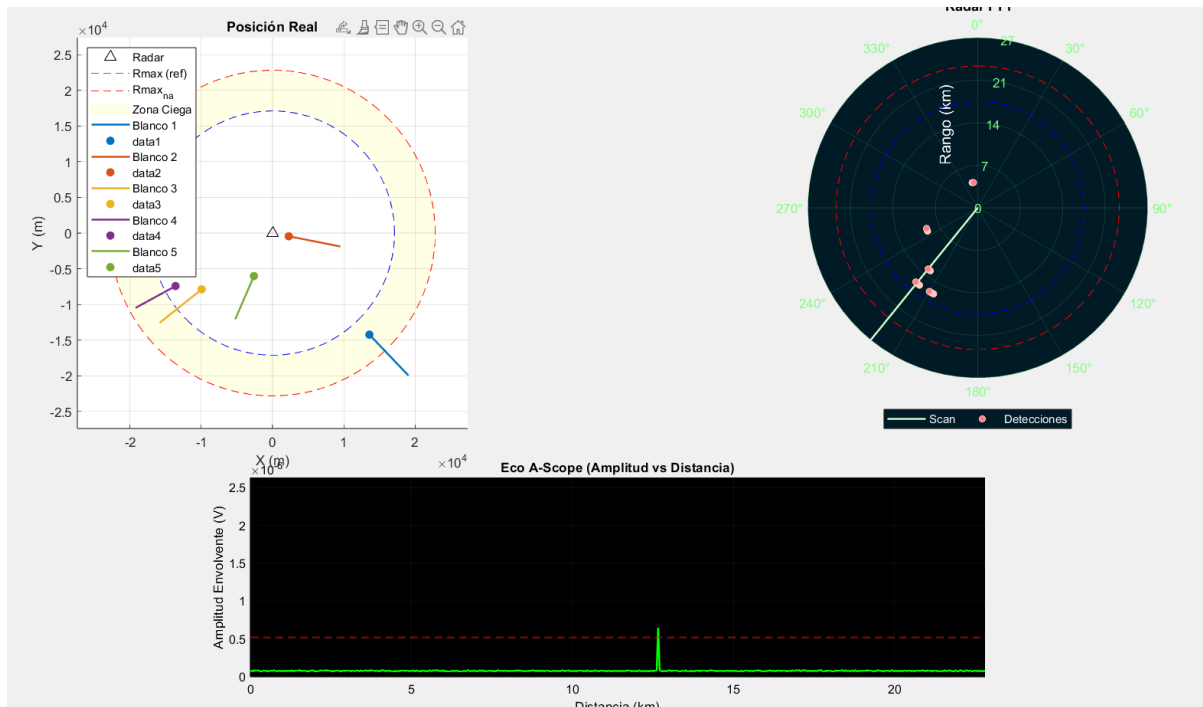


Figura 5: Blancos 2, 3, 4 y 5 en la zona de detección radar.

## 8.2. Blanco dentro de la zona ciega (entre $R_{max}$ y $R_{max, na}$ )

Cuando un blanco se encuentra físicamente en la zona ciega, el código impide que se intente su detección:

```
is_in_physical_blind_zone_k = (R_target_real_k >= Rmax &&
R_target_real_k < Rmax_na);
```

Aunque se encuentre iluminado por el haz, **no se evalúa** la detección y no aparecerá ni en el A-Scope ni en el PPI. Esta condición emula las limitaciones reales de muchos radares pulsados, donde el tiempo de escucha no permite cubrir este rango debido a la espera de posibles ecos ambiguos. Observable en la figura 6, donde el blanco 1 se encuentra en la zona ciega.

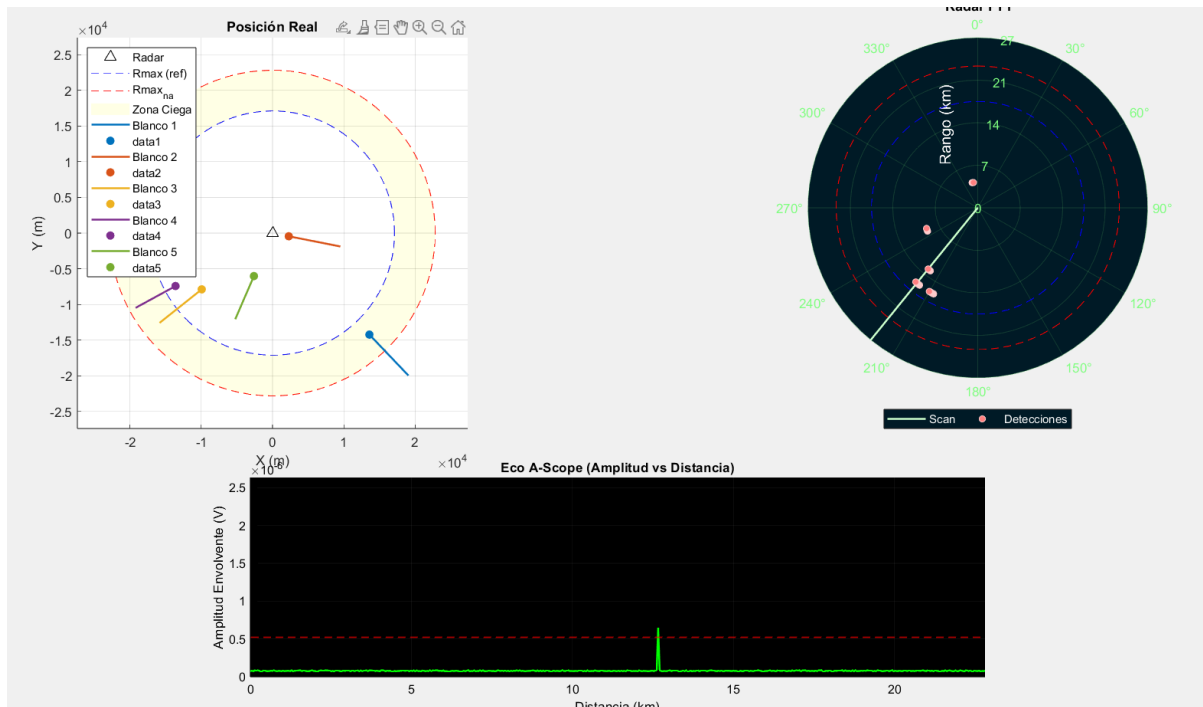


Figura 6: Blanco 1 en la zona ciega.

### 8.3. Blanco fuera del rango máximo no ambiguo

Los blancos con distancia real superior a  $R_{max,na}$  se representan con una **distancia aparente ambigua**, calculada mediante:

$$\text{mod}(R_{\text{target\_real\_k}}, R_{\text{max\_na}})$$

Esto hace que aparezcan **más cerca de lo que realmente están**, generando una detección engañosa. Es una manifestación clásica del efecto de **aliasing en distancia**, y se refleja directamente en el PPI como un blanco con ubicación incorrecta.

### 8.4. Blanco generado dentro del haz desde el inicio

Si un blanco es creado inicialmente dentro del haz del radar y en zona de detección efectiva, **aparece detectado de inmediato**. Esto puede observarse al inicio de la simulación o cuando un blanco es reiniciado y reaparece orientado directamente hacia el radar.

En el código:

```
% Dirección del blanco reiniciado siempre hacia el radar
velocity_direction_k = -target_pos(k_target, :) /
norm(target_pos(k_target, :));
```

Esto garantiza un comportamiento dirigido y una detección consistente desde el inicio, permitiendo analizar la evolución completa de la detección conforme se acerca.

### 8.5. Blanco pasa por encima del radar ( $R < R_{min}$ )

Uno de los casos más relevantes es cuando un blanco atraviesa directamente sobre la antena, generando una distancia menor a  $R_{min}$ . En este intervalo:

```
R_target_real_k > R_min % Filtro de rango mínimo
```

El blanco **no es considerado para detección**, incluso si está dentro del haz y su señal supera el umbral. Como consecuencia, el blanco **desaparece temporalmente del radar**, para luego reaparecer una vez que se aleja y supera de nuevo la distancia mínima.

Este fenómeno se visualiza claramente como una **interrupción momentánea** en la trayectoria del blanco en el PPI. Podemos visualizar un ejemplo con el blanco 2 en la figura 7.

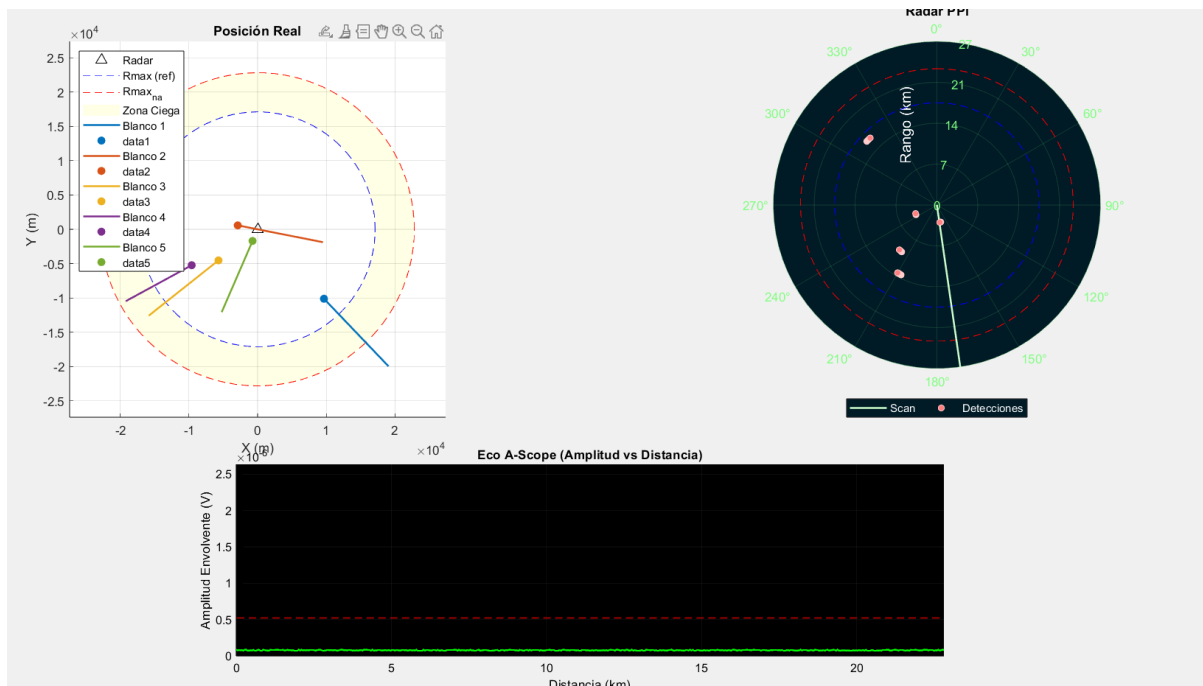


Figura 7: Blanco 2 por encima del radar ( $R < R_{min}$ ).

## 8.6. Reinicio de blancos lejanos

Si un blanco se aleja más allá de un umbral máximo (1.5 veces la distancia de generación inicial), se reinicia con nuevas condiciones:

```
if R_target_real_k > max_initial_range * 1.5 % Reinicio y  
nueva velocidad
```

Esto permite mantener un número constante de blancos activos en el entorno y evaluar múltiples escenarios durante una sola ejecución de la simulación.

El reinicio implica:

- Nueva posición aleatoria, pero dirigida hacia el radar.
- Velocidad renovada.
- Registro histórico reiniciado.

## 8.7. Finalización de la simulación

La simulación finaliza por dos razones:

### 1. Condición temporal:

Si *sim\_time* > 0 y el tiempo actual supera ese valor, se detiene automáticamente:

```
if current_time >= sim_time && sim_time > 0
```

### 2. Cierre manual de la ventana:

El bucle principal está controlado por la validez del *handle* gráfico:

```
while ishandle(main_fig)
```

Ambas condiciones aseguran una finalización controlada, liberando recursos y mostrando mensajes informativos.

### 8.8. Comportamiento de Detección en el A-Scope

Durante cada barrido, los picos correspondientes a blancos detectados se superponen sobre el ruido en el A-Scope, con formas generadas por interpolación en *ascope\_y\_data*. Si hay múltiples blancos simultáneamente detectables, se muestran múltiples picos en rangos diferentes.

La visualización se adapta automáticamente en cada iteración del bucle, representando en tiempo real el entorno radar.

### 8.9. Ajuste dinámico de escala en PPI y pantalla real

El sistema ajusta dinámicamente los límites del PPI y de la pantalla de posiciones reales según la detección y desplazamiento de los blancos:

```
if current_max_real_dim_all_targets >
current_xlim_real_val(2) axis(h_ax_real,
current_max_real_dim_all_targets * 1.1 * [-1 1 -1 1]);
```

Esto garantiza una representación adecuada incluso en escenarios de expansión rápida o aparición de nuevos blancos en zonas periféricas.

### 8.10. Conclusiones

El análisis de los distintos casos demuestra que la simulación está diseñada para capturar con fidelidad tanto las **capacidades operativas de un radar pulsado en rotación**, como sus **limitaciones físicas inherentes**. Se incorporan efectos como la ambigüedad en distancia, la zona ciega, la distancia mínima, la fluctuación del RCS (modelo de *Swerling*), y la interferencia con ruido aleatorio. Todo esto en un entorno controlado y visualmente representativo.



## 9. PROBLEMAS, LIMITACIONES Y SOLUCIONES IMPLEMENTADAS

Durante el desarrollo del proyecto surgieron diversas dificultades técnicas relacionadas con la implementación práctica de la simulación, que no estaban directamente asociadas a las propiedades físicas del radar, sino a aspectos computacionales o de visualización:

- **Acumulación excesiva de datos históricos:** Al registrar continuamente la posición de los blancos, se generaban estructuras de datos crecientes que ralentizaban la visualización y saturaban la memoria. Para evitarlo, se *limitó el historial por blanco a un número máximo de muestras* (equivalente a los pasos temporales planificados), desplazando los datos antiguos al registrar nuevos.
- **Desfase visual entre detección y posición real:** Dado que las detecciones en el PPI se almacenaban de forma independiente a las trayectorias reales, podía producirse una sensación de "desincronización" temporal. Este efecto fue mitigado ajustando el tiempo de visualización de cada detección a 1.5 veces la duración de un barrido completo, garantizando una correlación visual realista.
- **Interferencia de la leyenda con la visualización:** Al ser aleatoria la posición inicial de los blancos, en ocasiones uno de ellos aparecía oculto detrás de la leyenda de la pantalla de posición real. Para solucionarlo, se optó por permitir el movimiento manual de la leyenda, de modo que el usuario pueda reubicarla con el ratón según sea necesario.
- **Visualización de trayectorias demasiado densas o largas:** Inicialmente, las trayectorias completas de cada blanco se representaban sin filtrado, lo que generaba solapamientos y pérdida de claridad en simulaciones largas. La solución consistió en mantener únicamente un subconjunto de puntos recientes en pantalla, ofreciendo una visualización más limpia y dinámica.
- **Desbordamiento del alcance gráfico en pantalla real:** Si un blanco se desplazaba a zonas alejadas, podía quedar fuera del límite visualizado en la interfaz. Para solucionarlo, se implementó un sistema de ajuste automático de ejes en función de la distancia máxima alcanzada, permitiendo mantener siempre a los blancos visibles sin intervención manual.

Estas decisiones de diseño permitieron que la simulación mantuviera su rendimiento, estabilidad y claridad visual incluso en ejecuciones prolongadas o en presencia de múltiples blancos simultáneos.