

**DESARROLLO DE UNA TÉCNICA DE IDENTIFICACIÓN Y SEGUIMIENTO  
MULTI-ETIQUETA PARA UN SISTEMA DE RADAR ARMÓNICO**



**MANUELA VIVIANA CHACON CHAMORRO  
JUAN GABRIEL ORDOÑEZ ORDOÑEZ**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
SAN JUAN DE PASTO  
2018**

**DESARROLLO DE UNA TÉCNICA DE IDENTIFICACIÓN Y SEGUIMIENTO  
MULTI-ETIQUETA PARA UN SISTEMA DE RADAR ARMÓNICO**

**MANUELA VIVIANA CHACON CHAMORO  
JUAN GABRIEL ORDOÑEZ ORDOÑEZ**

**Trabajo de Grado en la modalidad investigación para optar por el título de  
Ingenieros Electrónicos**

**DIRECTOR  
PhD. WILSON OLMEDO ACHICANOY MARTINEZ  
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
SAN JUAN DE PASTO  
2018**

## **NOTA DE RESPONSABILIDAD**

“Las ideas y conclusiones aportadas en el siguiente trabajo de grado son responsabilidad exclusiva de los autores”

Acuerdo1. Artículo 324. Octubre 11 de 1966, emanado del honorable consejo directivo de la Universidad de Nariño

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**San Juan de Pasto, Noviembre 2018**

## DEDICATORIA

*“A mi abuelo Eduardo, a mi abuela María,  
A mi madre Sandra, a mis tías Ayda e Ingrid y  
Especialmente a mi hermana Sofía,  
Gracias por darle sentido, dirección y magnitud  
A cada acción de mi vida”*

*Manuela Viviana Chacón Chamorro*

*“A Dios porque sus planes son  
perfectos, en el tiempo indicado, con  
los sacrificios necesarios y la  
recompensa justa.  
A mis padres José Absalón Ordoñez,  
Rosa Aura Ordoñez y a todos mis  
hermanos como muestra de mis más  
sinceros agradecimientos, puesto que  
el título llevará mi nombre, pero los  
esfuerzos de toda una familia.”*

*Juan Gabriel Ordoñez Ordoñez*

## **AGRADECIMIENTOS**

*“Agradecemos a la Universidad de Nariño, al Departamento de Ingeniería Electrónica y al grupo de investigación GIIEE, por el apoyo en los procesos académicos y financieros para llevar a cabo esta investigación. Un agradecimiento especial a nuestro asesor Wilson Olmedo Achicanoy Martínez, por su motivación constante, por la confianza depositada y el tiempo dedicado a esta investigación, mil gracias. Así mismo, se agradece a William Romel Chamorro Fuertes por darnos a conocer un problema de su contexto laboral como biólogo, el cual dio origen a este trabajo. Finalmente, se agradece a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron para alcanzar nuestros objetivos y metas.”*

Manuela Viviana Chacón Chamorro  
Juan Gabriel Ordoñez Ordoñez

## RESUMEN

El rastreo de animales pequeños por métodos electrónicos es fundamental para la conservación del equilibrio en los ecosistemas y representa un desafío actual desde el punto de vista tecnológico. Actualmente, se han desarrollado sistemas electrónicos especializados para el seguimiento de estos grupos, tal es el caso del radar armónico, caracterizado por el empleo de transpondedores de tamaño reducido, peso ligero y funcionamiento en modo pasivo, pero que solo permite identificar un individuo a la vez, debido a que todos los transpondedores responden a la misma frecuencia.

En esta investigación se propone adaptar teóricamente una técnica de posicionamiento relativo y un algoritmo de trazado de trayectorias a un sistema de radar armónico, con el fin de lograr la identificación y seguimiento de varios objetivos. Para conseguir este propósito, se analizan dos técnicas de posicionamiento, la trilateración convencional y probabilística, las cuales se extienden a un escenario multi objetivo. Finalmente, para la identificación y trazado de trayectorias por objetivo, se propone el uso de un estimador Kalman en conjunto con un algoritmo de asociación de datos.

La metodología propuesta mejora el sistema del radar armónico actual, permitiendo el monitoreo de más de un individuo a la vez. Con esta investigación, se proporcionan las bases para una posible implementación de la técnica adaptada al sistema de radares armónicos, se contribuye a la investigación básica en el área de sistemas de radares, en el rastreo electrónico de fauna y de manera indirecta a la conservación ambiental, la protección de especies en peligro de extinción, el fortalecimiento de la biodiversidad biológica y el equilibrio ecológico.

## **ABSTRACT**

The tracking of small animals by electronic methods is fundamental for the conservation of the balance of the ecosystem and represents a real challenge from the technological point of view. Today, specialized electronic systems have been developed to monitor these groups, such as harmonic radar, characterized by the use of transponders of small size, light weight and passive mode operation. However, these radars can only identify one specimen at a time, given that all transponders operate at the same frequency.

In this work, we adapt a relative positioning technique and a trajectory estimation algorithm to a harmonic radar system. Our purpose is to identify and monitor several targets simultaneously. To achieve this, two positioning techniques (conventional and probabilistic trilateration) are analyzed, which we extend to a multi-objective scenario. Finally, we use a Kalman estimator together with a data association algorithm to identify and trace the target's trajectory.

The proposed methodology improves a conventional harmonic radar system, as it can track multiple individuals simultaneously. We also provide some insights into possible implementations of our technique, which contribute to the area of radar system, in the electronic tracking of fauna and indirectly in the environmental conservation, the protection of endangered species, the strengthening of biological diversity and the ecological balance.



## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	16
1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA.....	18
1.1. Definición del problema .....	18
1.2. Justificación .....	18
2. OBJETIVOS .....	19
2.1. Objetivo general.....	19
2.2. Objetivos específicos .....	19
3. MARCO TEORICO.....	20
3.1. Radares armónicos.....	20
3.2. Radares pulsados.....	21
3.2.1. Rango máximo no ambiguo .....	21
3.2.2. Resolución del sistema .....	22
3.3. Modelo matemático y arquitectura del radar armónico pulsado.....	22
3.3.1. Transmisor .....	23
3.3.2. Etiqueta armónica .....	23
3.3.3. Receptor.....	27
3.3.3.1. Filtrado e integración de pulsos .....	27
3.3.3.2. Detección.....	28
4. METODOLOGÍA.....	32
4.1. Simulación sistema de radar armónico pulsado .....	32
4.1.1. Etiqueta armónica .....	32
4.1.2. Sistema de radar .....	36
4.2. Estimación de coordenadas mediante trilateración .....	40
4.2.1. Trilateración Convencional.....	40
4.2.1.1. Escenario I.....	40
4.2.2. Trilateración probabilística .....	44
4.2.2.1. Escenario I.....	44
4.2.2.2. Escenario II.....	48

4.3.	Extensión a múltiples objetivos.....	48
4.3.1.	Planteamiento del problema.....	48
4.3.2.	Solución Trilateración convencional.....	50
4.3.3.	Solución Trilateración probabilística.....	57
4.4.	Extensión a múltiples objetivos móviles.....	60
4.4.1.	Modelado y simulación del desplazamiento de insectos.....	60
4.4.2.	Estimador Kalman y algoritmo de asociación.....	65
5.	RESULTADOS SISTEMA COMPLETO.....	71
6.	CONCLUSIONES.....	80
7.	RECOMENDACIONES.....	81
	BIBLIOGRAFIA.....	83
	ANEXOS.....	88

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de simulación diodos SMS7630 y HSCH5336.....	32
Tabla 2. Parámetros de simulación modelo circuital etiqueta armónica. ....	34
Tabla 3. Parámetros de simulación sistema de radar.....	36
Tabla 4. Parámetros de simulación calculados para el sistema de radar. ....	37
Tabla 5. Combinaciones de rangos correctas obtenidas con la metodología. ....	54
Tabla 6. Coordenadas estimadas y probabilidad asignada escenario 1 y 2. ....	60

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Arquitectura del sistema de radar armónico. ....	23
Figura 2. Diagrama equivalente circuital etiqueta armónica. ....	25
Figura 3. Diagrama de posibles escenarios de posiciones estación transmisora y receptora.....	29
Figura 4. Etiqueta armónica con inductor de sintonización.....	33
Figura 5. Transformada de Fourier corriente de la etiqueta armónica diodo a) HSCH5336 b) SMS7630.....	35
Figura 6. Resultados simulación proceso de recepción. a) Señal recibida. b) Señal filtrada. c) Señal integrada. ....	39
Figura 7. Resultados simulación resolución del sistema.....	40
Figura 8. Diagrama trilateración espacio bidimensional.....	41
Figura 9. Escenario tres antenas transceptoras.....	42
Figura 10. Error total de estimación escenario 1.....	43
Figura 11. Diagrama trilateración espacio bidimensional escenario 2. ....	44
Figura 12. Función de densidad de probabilidad para una estación transceptora. ....	45
Figura 13. Densidad de probabilidad a) conjunto de tres estaciones b) intersección tres estaciones.....	46
Figura 14. Error de estimación en distancia escenario 1 trilateración probabilística. ....	47
Figura 15. Error en estimación en distancia escenario 2 trilateración probabilística. ....	48
Figura 16. Situaciones no deseadas en un escenario de radar armónico con múltiples objetivos.....	50
Figura 17. Reducción geométrica: circunferencias a) interiores, b) exteriores.....	51
Figura 18. Posiciones reales y estimadas escenario 1 trilateración convencional. ....	55
Figura 19. Posiciones reales y estimadas escenario 2 trilateración convencional. ....	55
Figura 20. Simulación situaciones no deseadas. ....	57
Figura 21. Resultados trilateración probabilística múltiples objetivos a) escenario I b) escenario II. ....	59
Figura 22. Distribución “Wrapped Cauchy” a) Forma geométrica de la función representación polar b) Función de densidad de probabilidad. ....	61
Figura 23. Función de probabilidad acumulativa “Wrapped Cauchy”.....	62
Figura 24. Ambiente de simulación a) esquema b) función de atracción asociada. ....	63
Figura 25. Caminatas aleatorias cuatro individuos. ....	65
Figura 26. Estimador Kalman a) camino real y coordenadas estimadas b) error de estimación.....	67

Figura 27. Predictor Kalman y asignación de coordenadas Munkres. ....	70
Figura 28. Resultados 3 objetivos separados a) convencional b) probabilística. ....	73
Figura 29. Errores de estimación 3 objetivos separados a) convencional b) probabilística. ....	74
Figura 30. Resultados cruces entre objetivos a) probabilística c) convencional, errores de estimación b) probabilística d) convencional. ....	75
Figura 31. Resultados cruces entre objetivos región de incertidumbre técnica de posicionamiento trilateración convencional: a) trayectorias b) errores de estimación. ....	76
Figura 32. Resultados cruces entre objetivos región de incertidumbre técnica de posicionamiento empleada trilateración probabilística: a) trayectorias b) errores de estimación. ....	77
Figura 33. Resultados 5 objetivos técnica de posicionamiento aplicada a) trilateración convencional b) probabilística. ....	78

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Artículo presentado en XVI LACCEI INTERNATIONAL MULTI- CONFERENCIA FOR ENGINEERING, EDUCATION AND TECHNOLOGY. ( <a href="http://www.laccei.org/LACCEI2018-Lima/student_Papers/SP545.pdf">http://www.laccei.org/LACCEI2018-Lima/student_Papers/SP545.pdf</a> ) .....	<b>88</b>
<b>Anexo 2.</b> Certificado de asistencia LACCEI. ....	<b>93</b>

## GLOSARIO

**Algoritmo:** Conjunto ordenado de operaciones sistemáticas o reglas que permiten hallar la solución de un tipo de problemas mediante pasos sucesivos.

**Armónico:** En este trabajo se refiere a frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental o de transmisión.

**Bidimensional:** Espacio definido en dos dimensiones.

**Caminata aleatoria:** Trayectoria que resulta de hacer sucesivos pasos aleatorios.

**Colineal:** Hace referencia a dos o más elementos que se encuentran en una misma línea.

**Diodo:** Dispositivo electrónico semiconductor.

**Dipolo:** En este trabajo hace referencia a una antena con alimentación central empleada para transmitir y/o recibir ondas de radio frecuencia.

**Estación transceptora:** Estación radio eléctrica transmisora – receptora.

**Funcionamiento Pasivo:** En este trabajo se refiere al modo de funcionamiento de un dispositivo electrónico que no requiere fuente de alimentación.

**MATLAB:** Software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio, que permite emular los diferentes entornos de radar propuestos en esta investigación.

**Tag:** En este trabajo hace referencia al transpondedor que identifica a un objetivo.

**Transpondedor:** Dispositivo electrónico transmisor respondedor, en esta investigación es la etiqueta armónica tipo dipolo.

**Trilateración:** Método matemático empleado para determinar las posiciones relativas de objetivos empelando la geometría.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el seguimiento de fauna es una actividad común para fines de estudio e investigación, encaminándolo a múltiples propósitos como: la preservación de especies, el control de plagas, el fortalecimiento de la biodiversidad biológica y la conservación del equilibrio ecológico. Los métodos de seguimiento de fauna se han modernizado y el uso de la electrónica ha facilitado este proceso; por ejemplo, mediante la aplicación de métodos de comunicación y transmisión de datos, tales como emisores vía satélite, GPS y módulos de radio frecuencia; todos aptos para el rastreo de especies de tamaño considerable [1], [2].

A diferencia de este tipo de especies, para el seguimiento de animales de tamaño pequeño, como insectos, se ha utilizado tradicionalmente métodos de captura, marca y recaptura, a través de trampas de caída, trampas de luz, trampas con cebo y demás [3], [4], que resultan ser inconvenientes, entre otras razones, por la alteración del ambiente y del comportamiento natural de la especie. Para minimizar estos efectos se han utilizado sistemas de radar, no obstante, el problema del seguimiento de insectos radica en su tamaño al ser virtualmente indistinguibles del entorno, debido a que la energía reflejada por la incidencia de las ondas electromagnéticas sobre el insecto es despreciable en comparación a la energía reflejada por el entorno, y esto conlleva a la invisibilidad del blanco u objetivo. Una posible solución es situar sobre el insecto una etiqueta armónica que contiene un dispositivo no lineal, el cual al ser iluminado por el haz del radar genera armónicos de la señal transmitida, constituyendo lo que se conoce en general como un sistema de radar armónico.

Los sistemas de radares armónicos han sido ampliamente utilizados para el seguimiento de animales pequeños (abejas, escarabajos, langostas, etc.) [5]–[8]. Este sistema presenta ciertas ventajas, como la utilización de transpondedores de tamaño reducido y en modo de funcionamiento pasivo, para la mayoría de los diseños; sin embargo, solo permite detectar una etiqueta a la vez debido a que todas responden a la misma frecuencia, requiere emplear frecuencias elevadas (en GHz) que limitan su alcance y está sujeto a las exigencias de la disposición del ambiente.

Ante la situación planteada es evidente que un sistema de radar armónico para rastreo de insectos tiene varias limitantes, se restringe a insectos de desplazamiento corto, no permite la caracterización del comportamiento individual de varios insectos al mismo tiempo y la exactitud de los resultados se afecta con



los obstáculos presentes en la disposición geográfica, las condiciones climáticas y el comportamiento del insecto [8], [9].

El propósito del presente estudio es adaptar teóricamente una técnica de posicionamiento relativo y un algoritmo de trazado de trayectorias a un sistema de radar armónico, con el fin de encontrar la posición de múltiples objetivos dispersos en un área definida y construir sus trayectos. La metodología a desarrollar mejora el sistema de radar armónico eliminando una de las limitaciones previamente planteadas. La investigación se constituye por las siguientes etapas: determinar la arquitectura y el modelo matemático de un sistema de radar armónico, analizar dos técnicas de posicionamiento relativo la trilateración convencional y probabilística para después extenderlas a escenarios multi objetivo, posteriormente proponer un algoritmo de asociación de datos que en conjunto con un estimador Kalman permite trazar el trayecto individual de cada objetivo, finalmente se valida el sistema completo a través de diferentes escenarios de simulación empleando el software MATLAB.

## **1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA**

### **1.1. Definición del problema**

¿Cómo caracterizar el desplazamiento de múltiples etiquetas en un sistema de radar armónico que permita la identificación y el seguimiento de varios insectos?

### **1.2. Justificación**

Conocer el comportamiento de la fauna y flora es necesario para frenar el deterioro del equilibrio ecológico que existe en la actualidad debido a la pérdida de diversidad biológica y la destrucción de los ecosistemas. El comportamiento de la fauna puede ser estudiado empleando métodos de rastreo que permitan definir el desplazamiento de un determinado ejemplar; sin embargo, las especies de tamaño reducido, como es el caso de varios invertebrados, representa un desafío en las técnicas de rastreo electrónico. El estudio de estas especies es de suma importancia dado que son fundamentales para mantener el equilibrio del ecosistema; las funciones que desempeñan como polinización, eliminación de suciedad y parasitismo entre otras, proveen las condiciones necesarias para la vida [10].

Uno de los sistemas propuestos para vencer el desafío que representa el rastreo electrónico de las especies de tamaño pequeño se conoce como radar armónico. Si bien es cierto el sistema ha sido empleado en el seguimiento de algunas especies de insectos y de algunos anfibios pequeños [11], [12], no es menos cierto que este presenta varias limitaciones. Un gran porcentaje de especies de tamaño pequeño se desplazan a cortas distancias, lo que hace factible el uso de un sistema de radar armónico, pero el estudio especializado de una o más especies requiere hacer el seguimiento a más de un ejemplar, por esta razón el diseño de una técnica de posicionamiento que permita la identificación de varias etiquetas en un sistema de radar armónico facilitará este estudio.

Un rastreo especializado de una determinada especie proveerá de herramientas a los profesionales del área para determinar su comportamiento natural, establecer una caracterización de la biodiversidad existente, proteger las especies amenazadas, controlar sus dinámicas demográficas atípicas y generar un aporte a la investigación básica.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

Proponer una técnica de posicionamiento que permita caracterizar el desplazamiento de varios transpondedores para un sistema de radar armónico.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Analizar un modelo del sistema de radar armónico convencional con el propósito de caracterizar su comportamiento.
- Seleccionar una técnica de posicionamiento ya existente que se pueda adaptar en un sistema de radar armónico.
- Proponer una técnica que permita el seguimiento y la identificación de varias etiquetas a partir del modelo del sistema de radar armónico convencional y la técnica de posicionamiento seleccionada.
- Estimar la viabilidad de los resultados obtenidos.

### 3. MARCO TEORICO

#### 3.1. Radares armónicos

Según la linealidad, los sistemas de radar se clasifican como lineales o no lineales (armónicos), aunque todos los sistemas de radio frecuencia y microondas presentan cierto grado de no linealidad debido a elementos como amplificadores, diodos, antenas, cables, acoples, entre otros [13]. Un sistema es considerado lineal cuando satisfice las propiedades de homogeneidad y aditividad, por el contrario, cuando esto no ocurre se considera como no lineal. La salida de un sistema no lineal no puede ser representada como una combinación lineal de la señal de entrada, consecuencia de la violación del principio de superposición.

Como no es posible determinar la salida correspondiente a la suma de varias señales de entrada a través de combinaciones lineales, una de las formas es recurrir a la aproximación en series de potencias para modelar la respuesta del sistema no lineal. En la ecuación (1) se detalla el modelo de series de potencia considerando  $y$  la salida y  $x$  la entrada del sistema.

$$y = \sum_{i=0}^{\infty} y_i = \sum_{i=0}^{\infty} a_i x^i \quad (1)$$

Si la entrada al sistema no lineal corresponde a un tono sinusoidal, como el detallado en la ecuación (2) de frecuencia determinada  $\omega_o = 2\pi f_o$ , el modelo de series de potencia indica que a la salida del sistema se generan armónicos en múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (3).

$$x = x_0 \cos(\omega_o t + \theta) \quad (2)$$

$$y = a_o + a_1 x_0 \cos(\omega_o t + \theta) + a_2 x_0^2 \cos^2(\omega_o t + \theta) + \dots + a_n x_0^n \cos^n(\omega_o t + \theta)$$
$$y = a_o + \frac{1}{2} a_2 x_0^2 + (a_1 x_0 + \frac{3}{4} a_3 x_0^3) \cos(\omega_o t + \theta) + \frac{1}{2} a_2 x_0^2 \cos(2\omega_o t + 2\theta) + \dots \quad (3)$$

Un radar no lineal se consigue incluyendo dispositivos no lineales en el objetivo, según la literatura los más empleados son los diodos y se destaca el uso del diodo Schottky [7], [14], [15]. En estos sistemas, una onda electromagnética con determinada frecuencia fundamental  $f_o$  incide sobre una etiqueta armónica,

conformada por una antena y el dispositivo no lineal. La etiqueta refleja una señal que contiene múltiplos enteros de la frecuencia fundamental; esto se conoce como respuesta armónica. La recepción de la señal se realiza a la frecuencia de uno de los armónicos con el objetivo de diferenciar el blanco de las reflexiones del entorno conocidas como *clutter*, generalmente se recibe el segundo armónico debido a que la intensidad de la energía reflejada es inversamente proporcional al número de armónicos.

### 3.2. Radares pulsados

Los radares pulsados se caracterizan por transmitir una señal en intervalos de tiempo. La señal principal es modulada por un tren de pulsos con características especiales. Matemáticamente, la forma que describe este tipo de radares se expone en (4), donde un tono de frecuencia  $f_o$  y desfase  $\theta$  es modulado por un tren de pulsos  $Tr(t)$ .

$$V_{tx}(t) = V_o \cos(2\pi f_o t + \theta) Tr(t) \quad (4)$$

Se puede definir el tren de pulsos como se presenta en (5), la función  $\Pi\left(\frac{t}{PW}\right)$  corresponde en términos del escalón unitario a  $u(t) - u(t - PW)$ , se denota el periodo de repetición como  $PRT$  por sus siglas en ingles “*Pulse Repetition Time*” y el parámetro  $PW$  “*Pulse Width*” es el tiempo en el cual el pulso se encuentra activo (5).

$$Tr(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \Pi\left(\frac{t - nPRT}{PW}\right) \quad (5)$$

#### 3.2.1. Rango máximo no ambiguo

La distancia  $d_T$  entre la estación transceptora y el objetivo puede ser determinada por el retardo de tiempo entre la señal enviada y la recibida, como se presenta en la ecuación (6), donde  $c$  es la velocidad de la luz y  $\tau$  el retardo de tiempo entre el envío y recepción de la señal, el factor  $1 / 2$  se incluye debido a que la estación transceptora es la encargada de transmitir y recibir el pulso. Por lo tanto, la onda recorre el trayecto desde la estación al objetivo y regresa abarcando la misma distancia. Si el sistema de transmisión y recepción del radar pulsante no se encuentra a la misma distancia del objetivo, la ecuación (6) se modifica como se observa en (7); la distancia total será la suma de la distancia transmisor – objetivo  $d_t$  y objetivo – receptor  $d_r$ .

$$d_T = \frac{c\tau}{2} \quad (6)$$

$$d_T = d_t + d_r = c\tau \quad (7)$$

En un sistema de radar pulsante se espera que el eco de un pulso llegue antes de la transmisión del siguiente pulso, de manera que se pueda asociar cada eco con último pulso enviado. Si no se recibe un eco antes de transmitir el siguiente pulso, no se podrá determinar a qué pulso corresponde. Como no es posible asociarle un pulso de referencia, no se puede encontrar el retardo del tiempo y como consecuencia la distancia determinada es ambigua [16].

Existe por tal, una distancia máxima sin ambigüedades que se establece en función del tiempo de repetición de los pulsos  $PRT$ . Cuando se emplean estaciones transceptoras, la ecuación que establece el alcance máximo no ambiguo se detalla en la ecuación (8) y de forma general, cuando la posición del transmisor difiere de la del receptor se emplea la relación matemática (9).

$$R_u = \frac{c PRT}{2} \quad (8)$$

$$R_u = c PRT \quad (9)$$

### 3.2.2. Resolución del sistema

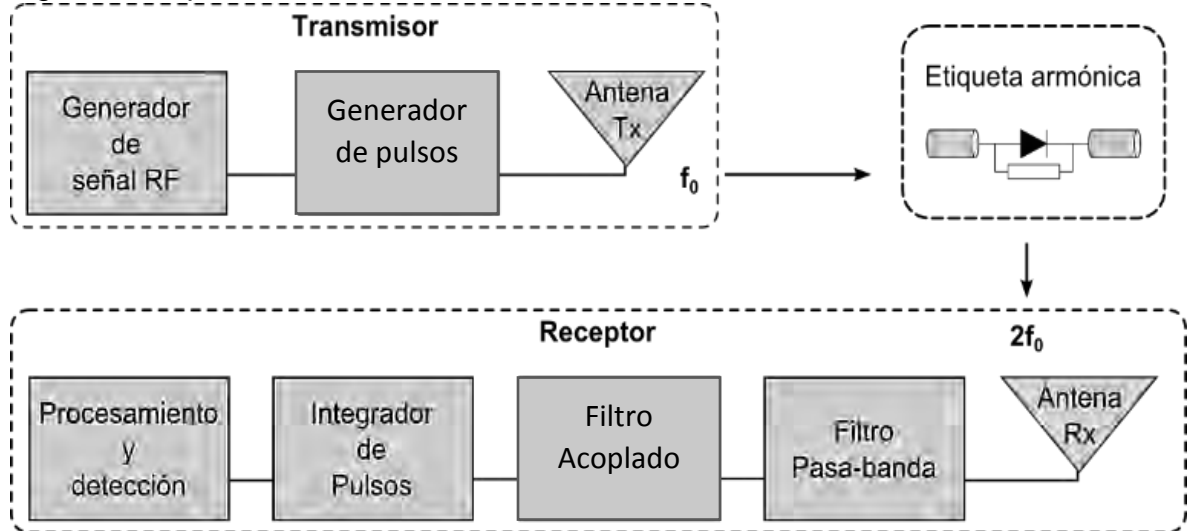
La resolución del sistema se define como la distancia mínima que debe existir entre dos objetivos para lograr la detección de ambos [16], [17]. La ecuación (10) define la resolución de un sistema de radar en función del ancho del pulso  $PW$  y  $c$  la velocidad de la luz.

$$r_{es} = \frac{c PW}{2} \quad (10)$$

### 3.3. Modelo matemático y arquitectura del radar armónico pulsado

En la Figura 1 se presenta la propuesta de arquitectura de radar armónico de onda pulsante, conformado por el transmisor, el receptor y la etiqueta armónica.

Figura 1. Arquitectura del sistema de radar armónico.



Fuente: creación propia.

### 3.3.1. Transmisor

El transmisor se encarga de generar y transmitir un tono sinusoidal,  $v(t) = V_o \cos(2\pi f_0 t + \theta)$ , modulado por un tren de pulsos  $Tr$  como el presentado en la ecuación (5). La potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE) en el punto de transmisión matemáticamente se expresa con el producto de la potencia de transmisión  $P_T$  y la ganancia de la antena transmisora  $G_T$ .

### 3.3.2. Etiqueta armónica

Se puede construir una etiqueta armónica empleando una antena tipo dipolo y un dispositivo no lineal, generalmente se toma un dipolo de longitud  $\frac{\lambda_o}{2}$ , donde  $\lambda_o$  corresponde a la longitud de onda en la frecuencia fundamental [14], [18]–[20]. Sin embargo, en diversas investigaciones se ha propuesto diferentes modelos de antena para la etiqueta armónica, en [7] se propone una antena de geometría fractal. Por su parte, una antena tipo dipolo impreso *bow-tie* es estudiada en [12] con el propósito del rastreo de pequeños caracoles en peligro de extinción, para el seguimiento de abejas se ha empleado transpondedores impresos con sofisticadas técnicas de desarrollo [5] estos son algunos de los estudios entorno a la geometría y características de la antena de la etiqueta. Como dispositivo no lineal, lo más común es emplear un diodo *Schottky*, debido a que requiere un bajo

potencial de operación y la potencia de la señal recibida por la antena es suficiente para activarlo.

Cuando se excita la etiqueta armónica con uno a más tonos sinusoidales, el diodo genera componentes armónicos que son reflejados por la antena. Generalmente el primer y el segundo armónico son re-irradiados, mientras las demás componentes son despreciables por la ineficiencia de la antena en las otras frecuencias y la baja potencia con la que se generan.

La corriente característica del diodo, en términos del voltaje de excitación  $V(t)$ , se describe en la ecuación (11). El parámetro  $I_s$  corresponde a la corriente de saturación y  $\alpha = q/n_eKT$ , donde  $q$  es la carga elemental,  $n_e$  es el coeficiente de emisión,  $K$  es la constante de Boltzmann y  $T$  es la temperatura absoluta de la unión. Al expandir en series de potencias la corriente característica del diodo y excitarlo con el tono sinusoidal, se puede obtener las componentes armónicas generadas por la etiqueta. En la relación matemática (12) se escriben las componentes hasta el segundo armónico,  $f_H = 2f_o$  es la frecuencia en el segundo armónico y los términos constantes corresponden a:  $k_0 = k_2 = \frac{I_s\alpha^2}{4}$  y  $k_1 = I_s\alpha$ .

$$i(t) = I_s (e^{\alpha V(t)} - 1) \quad (11)$$

$$i(t) \approx k_0 V_o^2 + k_1 V_o \cos(2\pi f_1 t) + k_2 V_o^2 \cos(2\pi 2f_1 t) \quad (12)$$

El circuito equivalente de la etiqueta armónica se compone de una fuente de tensión que modela el voltaje inducido en la antena  $v_a = l_o e_{inc}(t)$ , donde  $l_o$  es la longitud eléctrica de la antena y  $e_{inc}(t)$  el campo eléctrico incidente [21], la fuente se ubica en serie con la impedancia característica de la antena en la frecuencia fundamental  $Z_a(f_o) = R_a(f_o) + jX_a(f_o)$ , el componente real corresponde a la suma de la resistencia de radiación y de pérdidas  $R_a(f_o) = R_r + R_p$ . El diodo es representado por una resistencia efectiva  $Z_1 = k_1^{-1}$  en paralelo con una reactancia  $Z_d(f_o) = 1/(j2\pi f_o C_j)$ , el parámetro  $C_j$  corresponde a la capacitancia de unión  $p-n$  del diodo [20].

En la frecuencia armónica el diodo se modela con una fuente de corriente dependiente  $I_2 = k_2 V_o^2$  en paralelo con la reactancia del diodo en la frecuencia armónica  $Z_d(f_H)$ . De forma similar la antena corresponde al valor de la impedancia característica en el armónico  $Z_a(f_H)$ . El equivalente circuital propuesto satisface la ecuación (12), el conjunto de los dos circuitos conforma el modelo circuital diodo - antena, en la frecuencia fundamental y armónica [20].



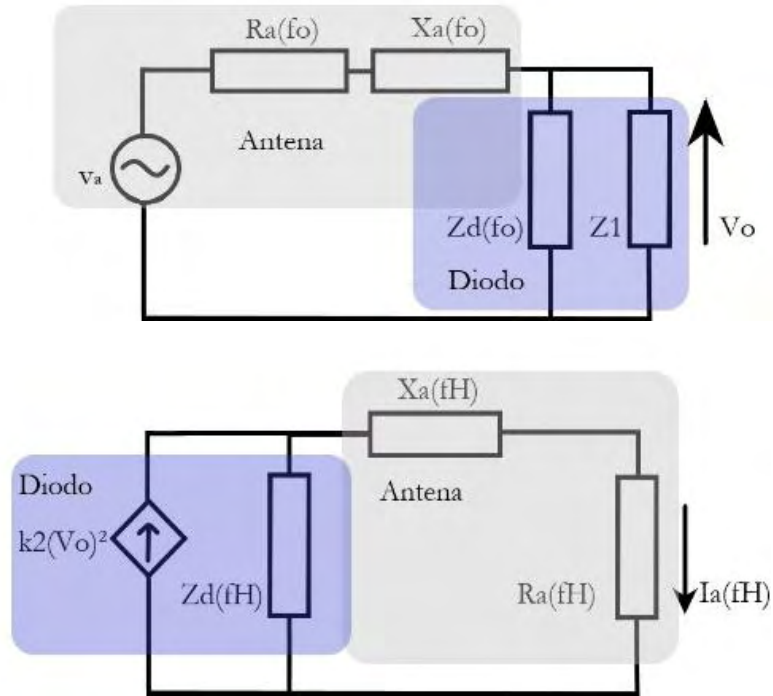


Figura 2. Diagrama equivalente circuital etiqueta armónica.

Fuente: adaptado de [20].

La densidad de potencia incidente  $W_{inc}$  en la etiqueta ubicada a una distancia  $d_t$  del transmisor, se establece mediante la relación matemática (13). La potencia de entrada  $P_{in}$  de la etiqueta es el producto entre la densidad de potencia  $W_{inc}$  y el área efectiva del tag en la frecuencia fundamental  $A_{eff}(f_o)$ . Esta última corresponde a la relación  $G_{tag} \frac{\lambda_o^2}{4\pi}$  donde  $G_{tag}$  es la ganancia de la etiqueta en la frecuencia fundamental con respecto a la antena isotrópica.

$$W_{inc} = \frac{P_T G_T}{4\pi d_t^2} [W/m^2] \quad (13)$$

$$P_{in} = W_{inc} A_{eff}(f_o) [W] \quad (14)$$

Como se explicó en la sección anterior, la etiqueta armónica es un sistema no lineal, en el cual la corriente se aproxima en series de potencias (12). Como consecuencia, si  $P_{in}$  y  $P_{out}$ , son la potencia de entrada y de salida de la etiqueta armónica, respectivamente y  $n$  corresponde al número de armónicos, entonces la potencia de salida se expresa con la ecuación (15).

$$P_{out} = \sum_{n=1}^{\infty} d_n P_{in}^n [W] \quad (15)$$

Remplazando la ecuación (14) en la ecuación (15), se puede encontrar la potencia de salida de la etiqueta en cada armónico (16),  $d_n$  es un coeficiente de escalamiento. La potencia isotrópica radiada por la etiqueta en el  $n$ -ésimo armónico corresponde al producto  $P_{out_n} G_{tag_n}$ , donde  $G_{tag_n}$  será la ganancia de la etiqueta en el armónico.

$$P_{out_n} = d_n \left( \frac{P_T G_T A_{eff}(f_o)}{4\pi d_t^2} \right)^n [W] \quad (16)$$

Un parámetro importante en el comportamiento de este sistema, se conoce como sección transversal de radar en inglés “*Radar Cross Section*” (RCS), este parámetro se considera como la medida de cuan detectable es un objeto. En los radares no lineales, caso particular de estudio el radar armónico con etiqueta tipo dipolo como se detalló en esta sección, el parámetro RCS  $\sigma_n$  depende de la eficiencia de conversión del diodo  $E_d$ , la ganancia del dipolo en el  $n$ -ésimo armónico  $G_{tag_n}$  y su área efectiva  $A_{eff}(f_o)$  [13], [18], [19], como se expresa en la ecuación (17).

$$\sigma_n = E_d G_{tag_n} A_{eff}(f_o)^n [m^2] \quad (17)$$

El coeficiente de escalamiento  $d_n$ , se aproxima a la eficiencia de conversión del diodo  $E_d$  [18], [19], finalmente la potencia re-irradiada por la etiqueta se detalla en la ecuación (18).

$$P_{irr} = \sigma_n \left( \frac{P_T G_T}{4\pi d_t^2} \right)^n [W]$$

### 3.3.3. Receptor

Para determinar la densidad de potencia incidente en el punto de recepción  $W_r$ , se asume que la etiqueta se comporta como una antena isotrópica que irradia energía de manera uniforme en todas las direcciones, la potencia aplicada por dicha antena se repartirá uniformemente en el área de una esfera. Como consecuencia, la densidad de potencia en el receptor ubicado a una distancia  $d_r$  de la etiqueta, se consigue mediante la ecuación (19).

$$W_r = \sigma_n \left( \frac{P_T G_T}{4\pi d_t^2} \right)^n \frac{1}{4\pi d_r^2} [W/m^2] \quad (19)$$

Por lo tanto, la potencia recibida por el sistema receptor  $P_{rn}$ , para cada armónico  $n$  se obtiene con el producto de la densidad de potencia  $W_r$  y el área efectiva de la antena receptora  $A_{rn}$ , esta última es igual a  $\frac{G_{rn}\lambda_n^2}{4\pi}$ , donde  $G_{rn}$  es la ganancia de la antena receptora en el  $n$ -ésimo armónico y  $\lambda_n$  es la longitud de onda en la frecuencia de recepción.

$$P_{rn} = \frac{\sigma_n G_{rn} \lambda_n^2 (P_T G_T)^n}{(4\pi)^{n+2} d_t^{2n} d_r^2} [W] \quad (20)$$

#### 3.3.3.1. Filtrado e integración de pulsos

La señal que incide se acompaña de una fuente de ruido; generalmente, se considera la contaminación con ruido aditivo blanco gaussiano AWGN (*additive white Gaussian noise*) ya que este representa el comportamiento matemático de una perturbación aleatoria en sistemas de comunicaciones electrónicos, se caracteriza por presentar una densidad de potencia constante en el ancho de banda del sistema y amplitud con distribución Gaussiana.

Para bloquear señales en frecuencias diferentes a la frecuencia armónica  $f_H$  se emplea un filtro pasa-banda, y con el propósito de maximizar la relación señal ruido SNR (*signal-to-noise ratio*) y facilitar la detección de la señal, se propone un

filtro adaptado como en [16], en el cual la señal salida es la correlación de la señal contaminada de ruido con la de referencia. Lo anterior es equivalente a realizar la convolución de la señal recibida con la señal de referencia reflejada en el tiempo.

La respuesta matemática del filtro adaptado se muestra en la ecuación (21) donde  $r(t)$  es la señal recibida,  $y(t)$  es la salida del filtro y  $h(t)$  es la respuesta del filtro al impulso, la cual debe satisfacer que  $h(t) = S_{ref}(-t)$ ,  $S_{ref}$  equivale a la señal de referencia en banda base [22], [23].

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} r(\tau)h(t - \tau)d\tau \quad (21)$$

Después del proceso de filtrado, y aprovechando que la etiqueta armónica refleja una cierta cantidad de pulsos cuando es iluminada por el haz de radar, se realiza una integración de los ecos recibidos que mejora la probabilidad de detección. Este proceso, dependiendo del sistema, se realiza de forma coherente o no coherente. Cuando se preserva la relación de fase entre los pulsos recibidos, se logra una acumulación en amplitud de la señal al sumar los pulsos recibidos, esto se conoce como integración coherente. Por otra parte, cuando se pierde o no se tiene relación de fase entre los pulsos la integración que se realiza es de tipo no coherente.

### 3.3.3.2. Detección

Si la potencia mínima de recepción requerida para la detección es  $P_{min}$ , existe una distancia máxima  $d_{max}$  hasta la cual es posible la detección del objetivo. Asumiendo que  $d_t = d_r$  y empleando la ecuación (20) se expresa la distancia máxima con la relación (22) [5], [19].

La potencia mínima de recepción  $P_{min}$ , se determina con la ecuación (23). En donde,  $K$  es la constante de Boltzmann,  $T_0$  la temperatura absoluta,  $B$  el ancho de banda del receptor,  $F_n$  la figura de ruido, propia del sistema de detección y  $\gamma$  corresponde al umbral de detección [19], que se estudiara más adelante.

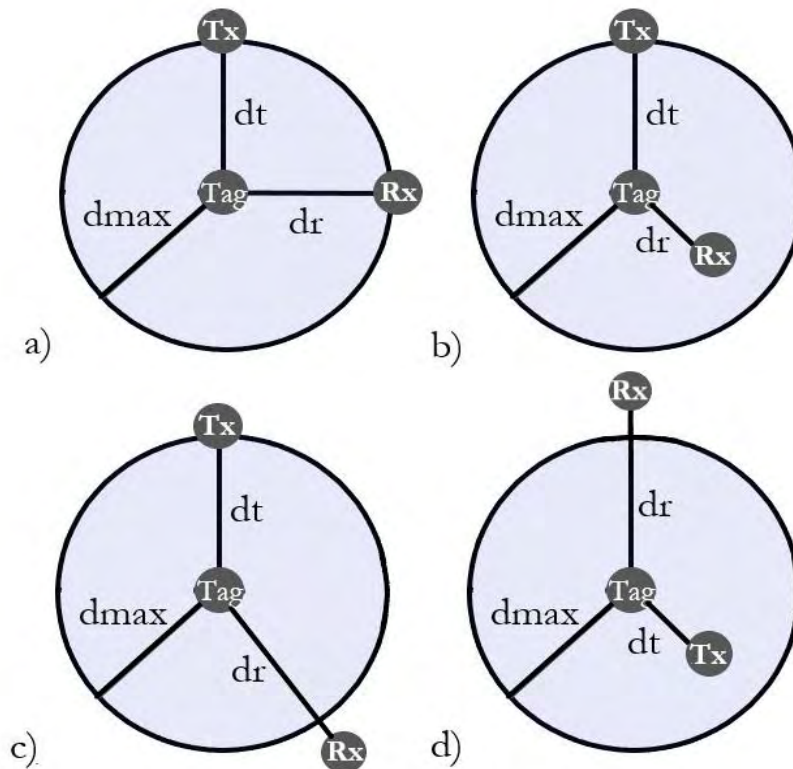
(22)

$$d_{max} = \sqrt{\frac{\sigma_n G_{rn} \lambda_n^2 (P_T G_T)^n}{(4\pi)^{n+2} P_{min}}}$$

$$P_{min} = \gamma K T_0 B F_n \quad (23)$$

Definiendo  $d_T$  como la suma de las distancias entre el transmisor- tag y tag- receptor,  $d_T = d_t + d_r$ , si  $d_{max}$  es la distancia máxima a la cual se puede posicionar tanto el transmisor de la etiqueta, como el receptor de esta, la distancia total máxima  $d_{Tmax}$  puede ser encontrada como  $d_{Tmax} = 2d_{max}$ . Lo anterior se deduce al asumir que las distancias  $d_t$  y  $d_r$  son iguales, sin embargo, no siempre  $d_t = d_r$ . A pesar de esto la distancia total máxima de detección siempre satisface  $d_{Tmax} = 2d_{max}$ .

Figura 3. Diagrama de posibles escenarios de posiciones estación transmisora y receptora.



Fuente: creación propia.

La Figura 3 muestra algunos casos posibles de la ubicación del sistema receptor y transmisor. La ilustración superior izquierda a) muestra el caso donde  $d_t = d_r$ , siendo estas distancias iguales a la distancia máxima  $d_{max}$ . La figura b) ilustra el caso en el cual una de las distancias es menor que  $d_{max}$ . En ambas situaciones el objetivo es detectable dada una sensibilidad del receptor correspondiente a  $P_{min}$ . Por su parte la ilustración c) presenta el caso en cual  $d_r > d_{max}$ , mientras  $d_t = d_{max}$ , de acuerdo a lo mencionado se puede verificar que  $d_{Tmax} > 2d_{max}$ , por lo cual el objetivo no será detectable, ya que la potencia que incide en el sistema receptor será menor que la mínima posible. Finalmente, en la situación exhibida en la imagen d) la distancia  $d_r > d_{max}$  y  $d_t < d_{max}$ , a pesar que ninguna distancia es igual a  $d_{max}$ , el objetivo será detectable mientras la suma de estas distancias sea menor igual que el doble de  $d_{max}$ . En cualquier caso, el objetivo es detectable mientras se satisfaga la relación  $d_{Tmax} > d_r + d_t$ .

El umbral de potencia eléctrica  $\gamma$ , permite identificar cuando un eco se considera procedente de la etiqueta armónica o no, esta situación se comporta como un *test de hipótesis binario*; si la señal recibida supera el umbral y representa la hipótesis de blanco presente  $H_1$ , por el contrario, mientras se encuentre por debajo será considerado como blanco ausente  $H_0$  [13], [24], [25].

Se considera la probabilidad de falsa alarma  $P_{FA}$  como la posibilidad de decidir  $H_1$  cuando la hipótesis correcta es  $H_0$ , y se define la probabilidad de detección  $P_D$  como la probabilidad de decidir  $H_1$  cuando la hipótesis correcta es  $H_1$ . Un umbral de detección alto implica menor probabilidad de falsa alarma y de detección. No obstante, un umbral bajo aumenta ambas probabilidades. El valor óptimo del umbral busca maximizar la probabilidad de detección y minimizar la de falsa alarma, sin embargo, esta situación no es posible ya que ambas probabilidades se relacionan directamente. Ante esta situación, se adopta el criterio óptimo de *Neyman – Pearson*, el cual busca maximizar la probabilidad de detección bajo la restricción de que la probabilidad de falsa alarma no exceda un valor constante [20], [26].

Para una señal contaminada con ruido blanco gaussiano aditivo AWGN el umbral de detección  $\gamma$  se definen por la ecuación (24), que se obtiene después de un análisis matemático detallado en [27]. Donde  $\rho^2$  representa la varianza del ruido blanco gaussiano,  $erfc$  es la función de error complementaria descrita en la ecuación (25) y  $N_i$ , en el caso de un radar pulsante, corresponde al número de pulsos a integrar. Incrementar el número de pulsos mejora la detección, pero no se puede elevar el número de manera indefinida, ya que se debe garantizar que el objetivo se mantenga en la misma posición para los pulsos integrados.

$$\gamma = \sqrt{2N_i\rho^2} \operatorname{erfc}^{-1}(2P_{FA}) \quad (24)$$

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (25)$$

Otro parámetro a tener en cuenta es la relación señal ruido  $SNR$  detallada en la ecuación (26), esta se define como la razón entre la potencia de la señal recibida  $P_{rn}$  y la potencia del ruido  $P_n = KT_0B$ . Por otra parte, definida la relación señal ruido y la probabilidad de falsa alarma, se puede encontrar matemáticamente la probabilidad de detección  $P_D$  aplicando la aproximación (27) como se detalla en [28].

$$SNR = \frac{\sigma_n G_{rn} \lambda_n^2 (P_T G_T)^n}{(4\pi)^{n+2} d_{max}^6 KT_0B} \quad (26)$$

$$P_D \approx 0.5 \operatorname{erfc}(\sqrt{-\ln P_{FA}} - \sqrt{SNR + 0.5}) \quad (27)$$

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Simulación sistema de radar armónico pulsado

#### 4.1.1. Etiqueta armónica

En este apartado se realiza la simulación del circuito equivalente de la etiqueta armónica tipo dipolo de media onda. Para llevar a cabo la simulación se emplea el software OrCAD, que permite realizar simulaciones electrónicas a frecuencias elevadas (GHz). Como se estudió, la etiqueta armónica se compone por un elemento que hace las veces de antena y un diodo Schottky, este último es el encargado del efecto armónico. Para la simulación se emplean los diodos SMS7630 y HSCH5336 [29], [30], sus características que se describen en la Tabla 1 permiten elaborar el modelo del diodo en el software de simulación.

Tabla 1. Parámetros de simulación diodos SMS7630 y HSCH5336.

Parámetro	SMS7630	HSCH5336
$B_v [V]$	2	5
$C_{j0} [pF]$	0.14	0.2
$E_G [eV]$	0.69	0.69
$I_{BV} [A]$	1E-04	10E-5
$I_s [A]$	5E-6	4E-8
$N$	1.05	1.08
$R_s [\Omega]$	20	6
$XTI$	2	2
$F_c$	0.5	0.5
$\alpha [V^{-1}]$	38	37
$M$	0.4	0.5

Fuente: a partir de [29], [30].

El sistema de radar armónico presentado en este trabajo, se orienta al rastreo de insectos, por esta razón las dimensiones de la etiqueta deben ser lo suficientemente pequeñas para ser soportadas por el insecto. Los diodos propuestos son ideales



para la aplicación, ya que presentan dimensiones y peso reducido. Además de lo anterior, ambos diodos operan hasta rangos elevados de frecuencia (1-24 GHz) [29], [30], lo que permite un correcto funcionamiento de la etiqueta si se trasmite la señal de interrogación en el rango de las microondas.

En la etiqueta armónica se desea que la potencia de transferencia entre la antena y el diodo se maximice para la frecuencia seleccionada y su armónico. Para este fin se busca que el dipolo y el diodo conformen un circuito resonante a la frecuencia  $f_o$  y  $f_H$ , entonces será necesario que la impedancia de entrada de la antena sea el complejo conjugado de la impedancia del diodo a ambas frecuencias [31]–[33]. Como opción alternativa, se puede incluir una reactancia inductiva que contrarreste la reactancia capacitiva de la unión del diodo a la frecuencia de resonancia. Sin embargo, también es necesario que la impedancia del dipolo sea puramente resistiva.

El valor del inductor de sintonización  $L_{tune}$  se obtiene a partir de la ecuación (28), donde  $C_j$  corresponde al valor de la capacitancia de la unión del diodo. La impedancia característica de un dipolo de media onda ha sido determinada en [21] como  $Z_{in} = 73 + j42.5 \Omega$ , la parte imaginaria de  $Z_{in}$  se reduce a cero si se acorta la longitud del dipolo. Dependiendo del diámetro del conductor, se consigue desvanecer la reactancia del dipolo cuando este tiene una longitud de  $l = 0.47\lambda$  a  $l = 0.48\lambda$ . No obstante, si el diámetro del conductor es elevado se debe reducir la longitud del dipolo en mayor cantidad hasta eliminar la parte imaginaria de  $Z_{in}$ . En la Figura 4 se detalla la posición física del inductor en relación a los elementos de la etiqueta. Una opción alternativa a la bobina de sintonización, dado que la longitud de onda es lo suficientemente pequeña, es diseñar un *balun*, dispositivo que permita el acople de impedancias en la etiqueta armónica.

$$2\pi f_o = \frac{1}{\sqrt{C_j L_{tune}}} \quad (28)$$

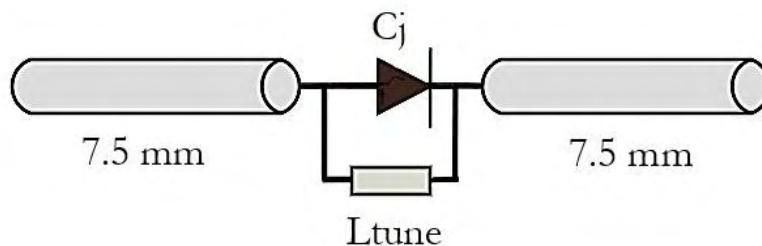


Figura 4. Etiqueta armónica con inductor de sintonización.

Fuente: creación propia y a partir de [18].

Para el caso particular de  $f_o = 9.41 \text{ GHz}$  la longitud de onda corresponde a 31.88 mm. La longitud física del dipolo de media onda es de 15.94 mm, de acuerdo con el análisis anterior, para que su impedancia de entrada sea puramente resistiva es necesario disminuir la longitud a  $0.48\lambda$ , lo que da como resultado una longitud de aproximadamente 15 mm. El cable que permite realizar la aproximación anterior debe ser de diámetro considerablemente pequeño, para ello se propone en [34] AWG #30 de cobre y en [14] el cable AWG #34 de acero chapado en cobre. Los datos empleados para la simulación del circuito equivalente estudiado en la Sección 3.3.2 se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de simulación modelo circuital etiqueta armónica.

Parámetro de simulación	SMS7630	HSCH5336
$k_1$	19E-3	$1.48 \times 10^{-6}$
$k_2$	1.8E-3	$1.369 \times 10^{-5}$
$L_{tune}$ [nH]	2	1.43
$V_a$ [V]	$0.02 \sin(2\pi f_o t)$	$0.02 \sin(2\pi f_o t)$
$R_a(f_l)$ [ $\Omega$ ]	73	73
$X_a(f_l)$ [ $\Omega$ ]	0	0
$Z_d(f_l)$ [ $\Omega$ ]	120.8	84.57
$Z_1$ [ $\Omega$ ]	5263	$675.67 \times 10^3$
$R_a(f_H)$ [ $\Omega$ ]	73	73
$X_a(f_H)$ [ $\Omega$ ]	0	0
$Z_d(f_H)$ [ $\Omega$ ]	60.4	42.28

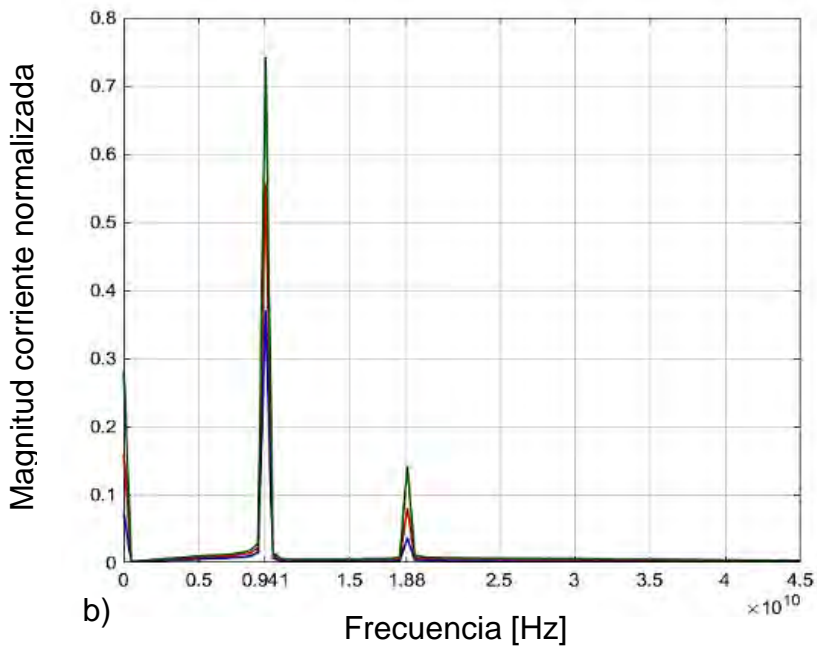
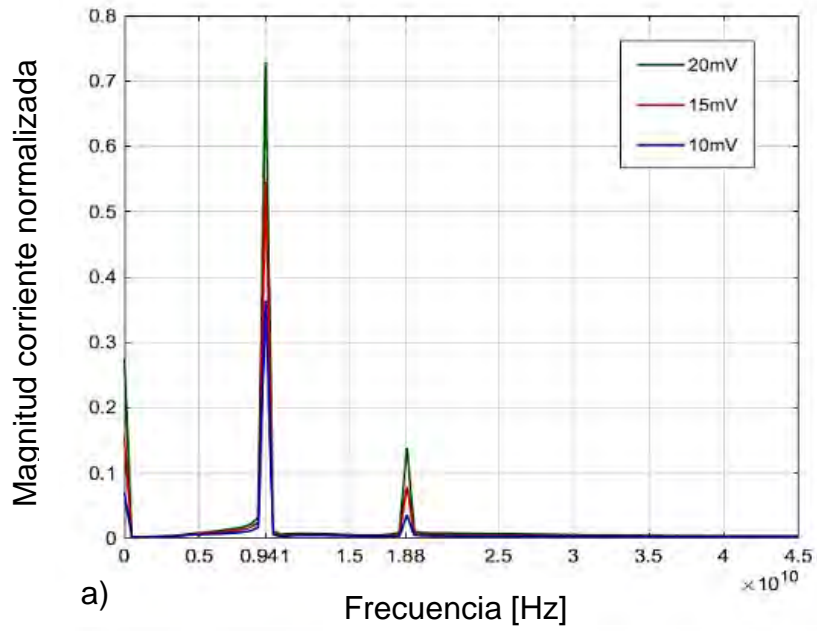
Fuente: creación propia y a partir de [29], [30].

En la Figura 5 se ilustran los resultados de la simulación del equivalente circuital con los parámetros de la Tabla 2, se presentan las componentes en frecuencia de la corriente del diodo que se ha normalizado en amplitud respecto a la corriente de saturación de cada diodo. En la imagen a) se observa los resultados para el diodo HSCH5336 a diferentes voltajes de excitación. La relación de amplitud entre la componente de la frecuencia fundamental y el armónico  $f_H = 18.82 \text{ GHz}$  satisface la ecuación (12), de la cual se obtiene la relación (29).  $Af_o$  corresponde a la amplitud de la corriente en la frecuencia fundamental y  $Af_H$  es la amplitud al segundo armónico. Situación similar se ilustra en la imagen b) para el diodo SMS7630, la diferencia entre los resultados mostrados para los dos diodos difiere

en un valor mínimo, esto se debe a que el parámetro  $\alpha$  es diferente para cada caso.

$$\frac{Af_o}{Af_H} = \frac{4}{\alpha V_o} \quad (29)$$

Figura 5. Transformada de Fourier corriente de la etiqueta armónica diodo a)



HSCH5336 b) SMS7630.

Fuente: creación propia.

La simulación realizada permite demostrar que se generan armónicos en la etiqueta cuando esta es excitada con pequeños voltajes. Por lo tanto, el modelo estudiado es viable para un sistema de radar armónico y, dadas las dimensiones propuestas, es aplicable al rastreo de insectos medianos sin alterar su comportamiento natural. La sección transversal de la etiqueta propuesta ha sido medida experimentalmente en [18], [19] y corresponde a  $2 \times 10^{-6} \text{m}^2$ .

#### 4.1.2. Sistema de radar

La simulación de la arquitectura de radar armónico se realiza en el software MATLAB, fijando los parámetros descritos en la Tabla 3. Con estos valores y el análisis teórico del Capítulo 3 se establecen todos los elementos necesarios para llevar a cabo la simulación, que consta de las etapas de: transmisión, propagación en el espacio libre transmisor - objetivo, generación de armónicos y reflexión de la señal por la etiqueta armónica, propagación en el espacio libre en el sentido objetivo – receptor, recepción de la señal, adición de ruido AWGN, filtrado, integración de pulsos y detección. La estimación del rango al cual se ubica el objetivo de la estación transceptora se obtiene a partir del retardo de tiempo entre el pulso enviado y recibido.

Tabla 3. Parámetros de simulación sistema de radar.

Parámetro	Símbolo	Valor
Frecuencia fundamental	$f_0$	9.41 GHz
Frecuencia armónica	$f_H$	18.82 GHz
RCS	$\sigma_n$	$2 \times 10^{-6} \text{m}^2$
Numero de pulsos a integrar	$N_i$	15
Rango máximo	$R_u$	100 m
Resolución	$r_{es}$	1 m
Ganancia antena de transmisora	$G_T$	28.5 dBi
Ganancia antena receptora	$G_{Rn}$	27.4 dBi
Probabilidad de falsa alarma	$P_{FA}$	$10^{-4}$
Figura de ruido	$F_n$	4 dB

Temperatura de referencia	$T_0$	290 K
---------------------------	-------	-------

Fuente: creación propia y a partir de [19].

La resolución del sistema y el rango máximo permiten establecer los parámetros del ancho del pulso  $PW$  y el tiempo de repetición  $PRT$  a partir de las ecuaciones (8) y (10). Con la probabilidad de falsa alarma y el número de pulsos a integrar se fija  $\gamma$  el umbral óptimo del criterio de *Neyman – Pearson* con la ecuación (24).

A partir del inverso del ancho de pulso se obtiene el ancho de banda  $B$ , con este valor, la figura de ruido y la temperatura de referencia, se establece la potencia del ruido. Una vez encontrado el valor de esta se calcula la potencia mínima de recepción como el producto entre la potencia del ruido y el umbral  $\gamma$  ecuación (23). Por otra parte, la relación señal ruido del sistema  $SNR$  se calcula con la ecuación (26). Finalmente, se establece la potencia de transmisión y la probabilidad de detección con las ecuaciones (22) y (27) respectivamente. Todos los parámetros calculados se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de simulación calculados para el sistema de radar.

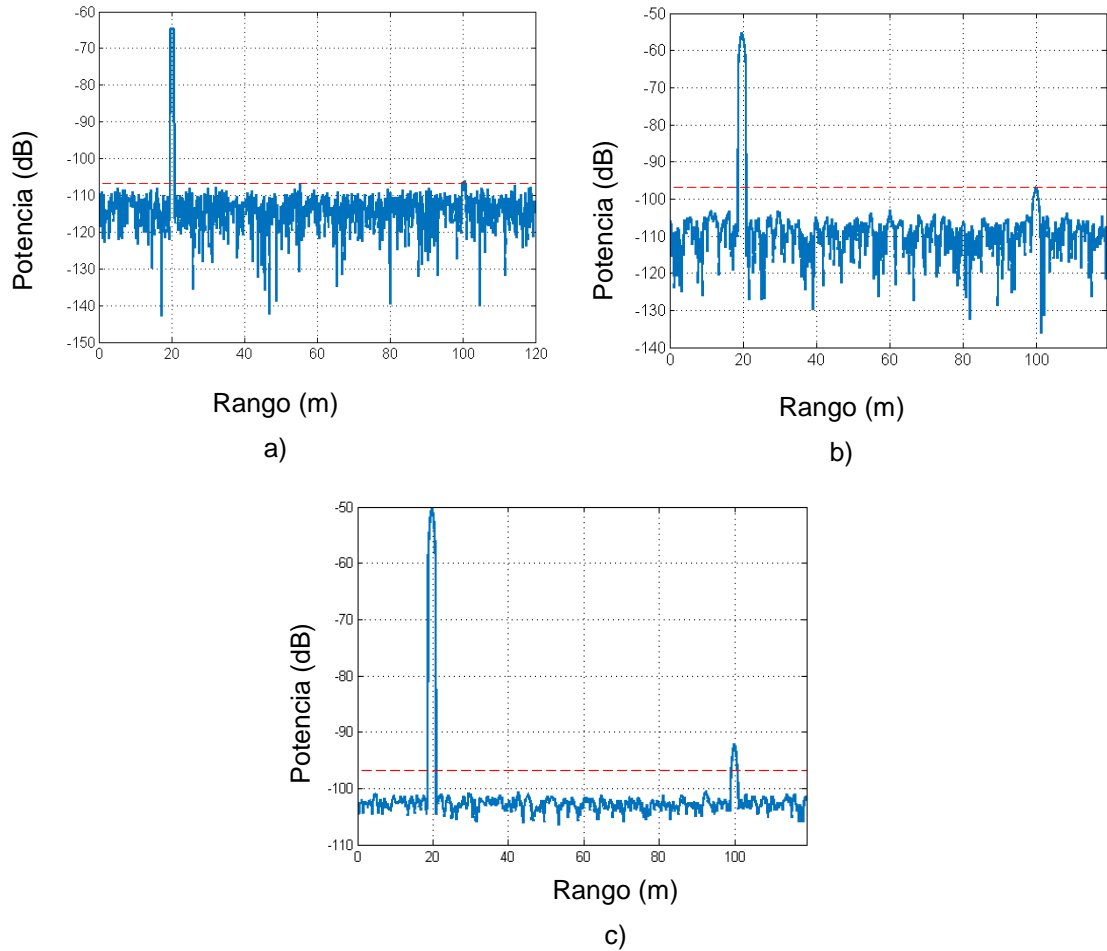
Parámetro	Símbolo	Valor
Ancho de pulso	$PW$	6.67 [ns]
Ancho de banda	$B$	150 [MHz]

Tiempo de repetición del pulso	$PRT$	0.667 [ $\mu$ s]
Umbral optimo <i>Neyman - Pearson</i>	$\gamma$	14.74 [dB]
Potencia mínima de recepción	$P_{min}$	-105 [dBW]
Potencia del ruido	$P_n$	-118 [dBW]
Relación señal ruido	$SNR$	13 [dB]
Potencia de transmisión	$P_T$	33.42 [dBW]
Probabilidad de detección	$P_D$	0.93

Fuente: creación propia.

El experimento de simulación ubica dos objetivos a una distancia de 20 y 100 m de la estación transceptora. En la Figura 6 se ilustran los resultados obtenidos del proceso de recepción de la arquitectura propuesta. La Figura 6.a muestra la potencia de la señal recibida y se observa que el eco reflejado por el objetivo que se ubica a 100 m, el rango máximo, no supera el umbral de detección y su potencia no se diferencia de algunos picos de ruido. Por otra parte, la potencia de la señal del objetivo ubicado a 20 m es mayor que el umbral de detección. En la Figura 6.b se muestra el efecto del filtro adaptado en la SNR, evidenciándose que existe una diferencia notoria entre los pulsos reflejados por los objetivos y el ruido del sistema. Finalmente, en la Figura 6.c se traza la señal después de llevar a cabo la integración de pulsos; como resultado se observa que el objetivo en el máximo rango no ambiguo supera el umbral de detección. Nótese como el umbral se ve afectado en los tres procesos indicados, esto se debe a que el filtro introduce una ganancia al umbral y maximiza la relación señal ruido. La simulación se realizó con una frecuencia de muestreo de 15 GHz.

Figura 6. Resultados simulación proceso de recepción. a) Señal recibida. b) Señal filtrada. c) Señal integrada.



Fuente: creación propia.

En otro escenario se ubican cuatro objetivos, los primeros en 40, 41.5 m y separados 1.5 m el uno del otro, se puede observar en la Figura 7 que, aunque el valor se aproxima a la resolución del sistema aún se pueden diferenciar los picos de los ecos recibidos, por otra parte entre los objetivos situados a 80 y 81 m existe una separación igual a la resolución del sistema y los picos son difícilmente diferenciables el uno del otro, por lo cual un objetivo es virtualmente indistinguible.

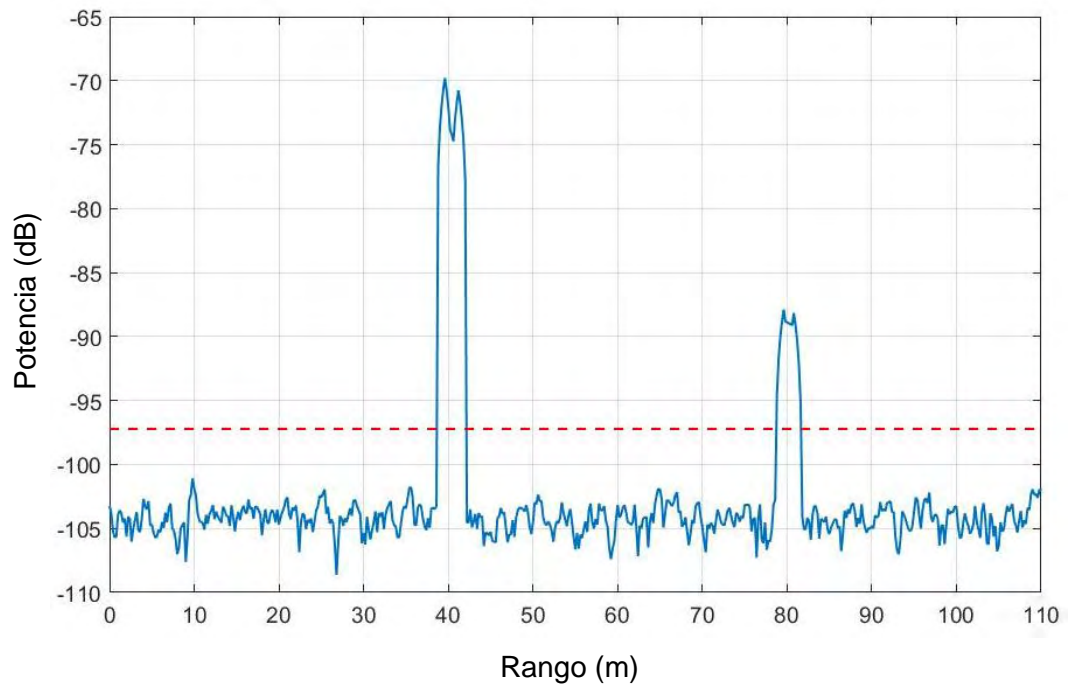


Figura 7. Resultados simulación resolución del sistema.

Fuente: creación propia.

En un sistema de radar armónico convencional, como el emulado en esta sección, permite estimar el rango en el cual se encuentra ubicado el objetivo; no obstante, se hace necesario la proposición de una técnica que permita estimar las coordenadas relativas sobre las cuales se ubica el objetivo.

## 4.2. Estimación de coordenadas mediante trilateración

### 4.2.1. Trilateración Convencional

La trilateración es una técnica de posicionamiento que emplea las medidas de las distancias entre el objetivo y varias estaciones receptoras, con el propósito de determinar las coordenadas relativas en las que se ubica el objetivo [35], [36]. Para un espacio definido en dos dimensiones es necesario contar con un mínimo de tres estaciones receptoras no colineales.

#### 4.2.1.1. Escenario I



En esta sección se describe la aplicación de la técnica mencionada al sistema de radar simulado en el apartado anterior, para un escenario de estudio en dos dimensiones que consta de tres estaciones transceptoras y un objetivo disperso en el área de búsqueda. En este escenario, se debe tener en cuenta que las estaciones transceptoras deben transmitir y recibir una a la vez, en consecuencia, mientras una estación opera las demás deben permanecer apagadas.

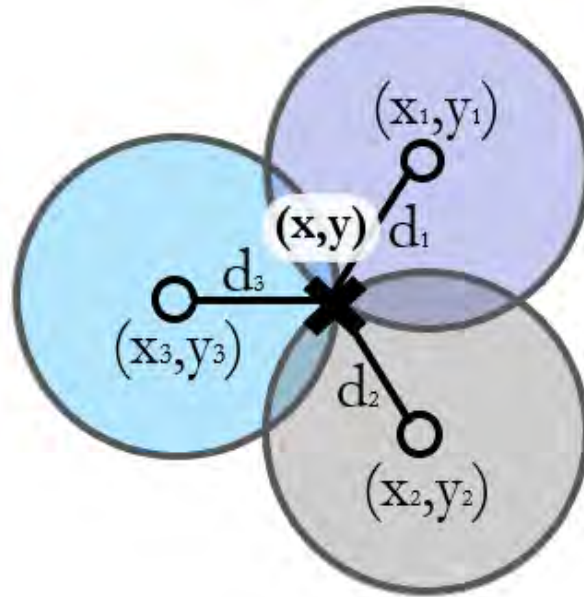


Figura 8. Diagrama trilateración espacio bidimensional.

Fuente: creación propia.

Las coordenadas del objetivo  $(x, y)$ , se encuentran al satisfacer el conjunto de ecuaciones (30). Donde,  $(x_i, y_i)$  corresponden a las posiciones de las estaciones transceptoras y  $d_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) son las distancias estimadas por las estaciones de radar entre el objetivo y cada una de estas, como se ilustra en la Figura 8.

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = d_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = d_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = d_3^2 \end{cases} \quad (30)$$

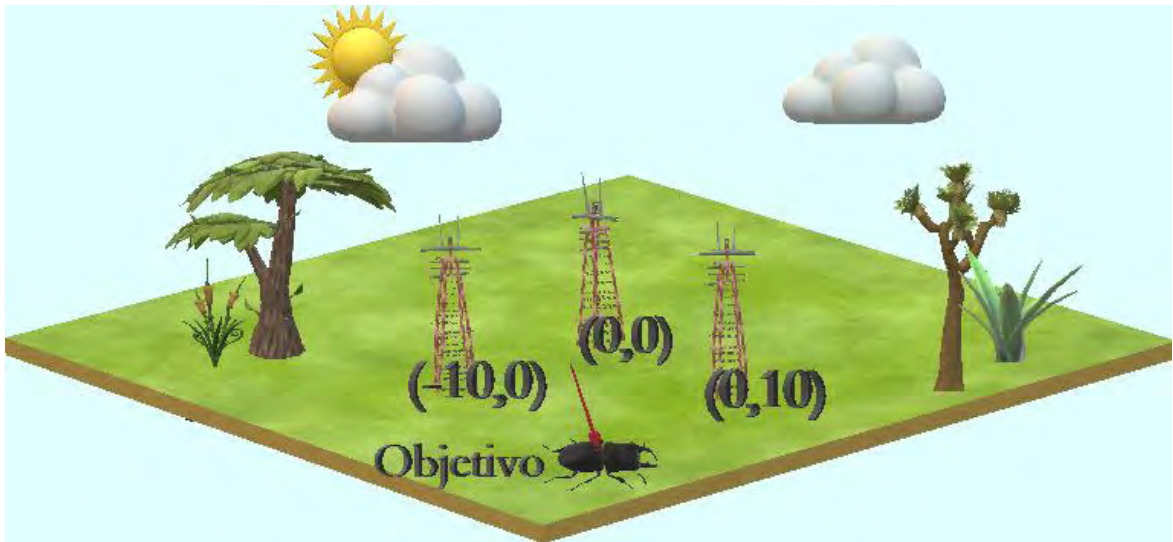
La ecuación (30) se puede reducir a un sistema lineal de la forma  $Ax = B$  (31), cuya solución, corresponde a las coordenadas  $(x, y)$ , donde se ubica el objetivo.

Para garantizar que la matriz A sea de rango completo se deben emplear tres antenas no colineales.

$$2 \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \\ (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \end{bmatrix} \quad (31)$$

Para analizar los resultados de esta técnica se plantea un escenario con tres estaciones transceptoras ubicadas en las coordenadas (0,0), (-10,0) y (0,10) m, cómo se ilustra en la Figura 9. Se generan 50 posiciones aleatorias para un objetivo localizado dentro del área de detección segura. Se considera que la detección del objetivo es probable mientras sea detectado por las tres estaciones transceptoras. Si cada una de estas estaciones tiene un rango máximo no ambiguo de 100 m, y se ubican en las coordenadas antes mencionadas, el área sobre la cual un objetivo podrá ser detectado por todas las estaciones corresponde a la intersección de tres circunferencias, de radio 100 m y centros equivalentes a las coordenadas de las estaciones. En este caso, corresponde a un área circular aproximada de 90 m de radio.

Figura 9. Escenario tres antenas transceptoras.



Fuente: creación propia.

El error entre las coordenadas estimadas y las diferentes posiciones aleatorias generadas, se presenta en la Figura 10. Debido a que los rangos estimados por el radar no son precisos, las coordenadas encontradas por medio de trilateración no serán exactas. Teniendo en cuenta el error en el rango máximo no ambiguo, una

cota de error máximo de la distancia entre la posición real y la estimada, para el escenario presentado corresponde al valor de  $\varepsilon \approx 30$  cm. Como se detalla en la Figura 10 el error de estimación de las 50 posiciones aleatorias no supera la máxima cota de error  $\varepsilon$ .

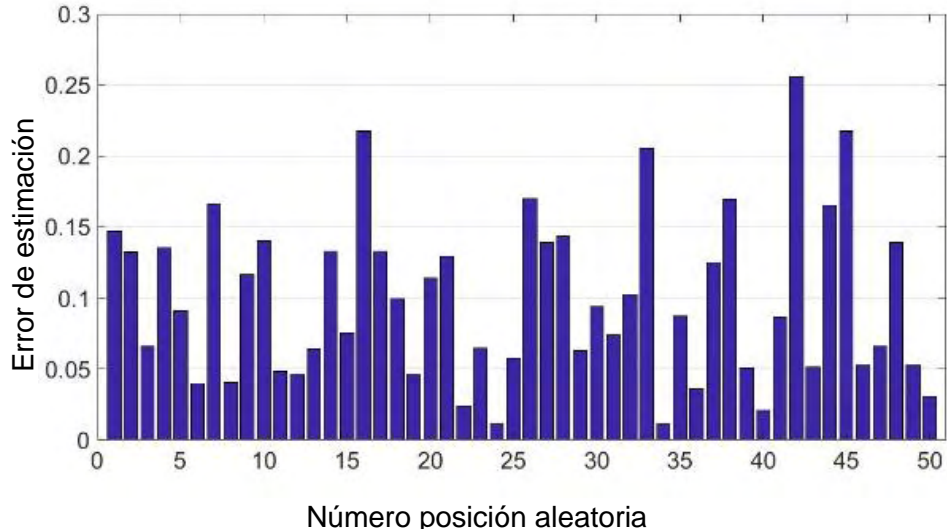


Figura 10. Error total de estimación escenario 1.

Fuente: creación propia.

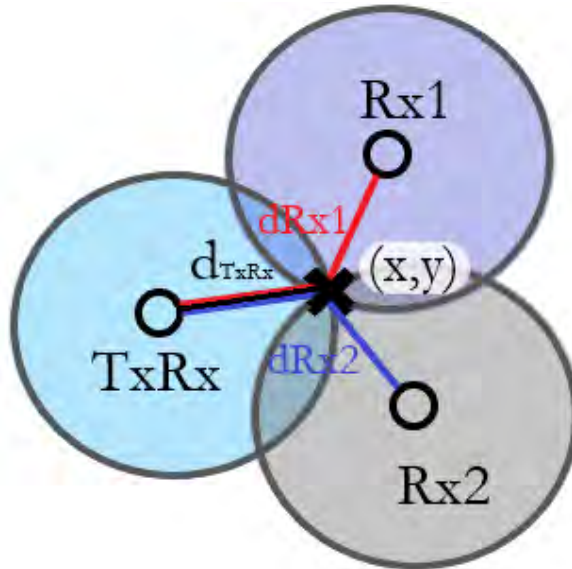
#### 4.2.1.2. Escenario II

Para el segundo escenario de estudio propuesto se emplean dos estaciones receptoras en  $(-10,0)$   $(10,0)$  m, una estación transceptora en  $(0,0)$  m y un objetivo disperso en el área de búsqueda. En este escenario, a diferencia del anterior, las tres estaciones deben operar al mismo tiempo. La estación transceptora es la encargada de transmitir y recibir la señal, mientras las otras dos solo reciben el eco.

Para este escenario el sistema de ecuaciones (30) se debe resolver teniendo en cuenta que las distancias  $d_1$  y  $d_2$  se calculan como la resta entre la distancia total estimada por las estaciones que comprenden el trayecto transmisor – objetivo – receptor  $d_{Rx1}, d_{Rx2}$ , con la distancia entre el objetivo y la estación transceptora  $d_{TxRx}$ , esta distancia corresponderá a  $d_3$ , como se ilustra en la Figura 11.

El error de estimación en distancia al ubicar un objetivo en las mismas 50 posiciones aleatorias del escenario anterior, no difiere de los resultados presentados en la Figura 10, el error máximo se encuentra por debajo de la cota establecida  $\varepsilon \approx 30$  cm.

Figura 11. Diagrama trilateración espacio bidimensional escenario 2.



Fuente: creación propia.

#### 4.2.2. Trilateración probabilística

La técnica de trilateración convencional, presenta inconsistencia y ambigüedades cuando la información de las coordenadas de las estaciones no es precisa o la estimación de las distancias  $d_i$  exhibe un grado de error. Las dos condiciones mencionadas son susceptibles de pasar en un sistema de radar armónico, en general en cualquier sistema de radar los errores en las medidas son posibles.

La trilateración probabilística busca mejorar las deficiencias que presenta el método convencional, por lo tanto, toma en cuenta el error que puede existir en las medidas. En esta técnica se define por cada estación receptora una función de densidad de probabilidad espacial  $f(x,y)$  para sistemas bidimensionales [36]. A diferencia de los escenarios de la sección anterior en los presentados se añade un error a los rangos estimados por el sistema de radar, para este fin se emplea una distribución uniforme que genere números aleatorios en el intervalo de  $[-30, 30]$  cm, de esta forma la técnica se orienta a un escenario más aproximado a un sistema real.

##### 4.2.2.1. Escenario I

El escenario consta de tres antenas transceptoras ( $A, B, C$ ) ubicadas en las posiciones  $(0,0)$ ,  $(-10,0)$  y  $(0,10)$  m y un objetivo disperso en el área de búsqueda. De forma general, sea la estación transceptora  $A$ , la función de densidad de probabilidad  $f_{PA}(x, y)$  relaciona a cada punto en el plano con la probabilidad de que el objetivo se encuentre sobre él, se emplea una función gaussiana que se describe con la ecuación (32). En la relación matemática  $d_A$  es la distancia estimada entre la estación  $A$  y el objetivo,  $\varepsilon_A$  corresponde a una medida relativa al error en la estimación de la distancia,  $(x_A, y_A)$  son las coordenadas de la estación  $A$  y la constante de normalización se define con  $N_A$ . La forma de la función de densidad de probabilidad para cada estación transceptora se ilustra en la Figura 12. Debido a que las medidas fueron contaminadas con un error de distribución uniforme en el rango  $[-30, 30]$  cm, para efectos de simulación, se fija el parámetro  $\varepsilon_i = 0.6$  m.

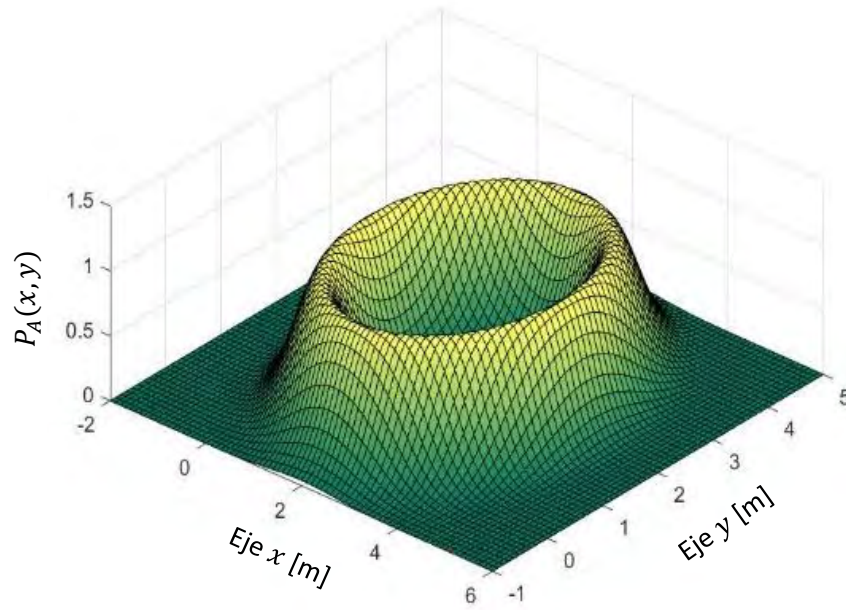


Figura 12. Función de densidad de probabilidad para una estación transceptora.

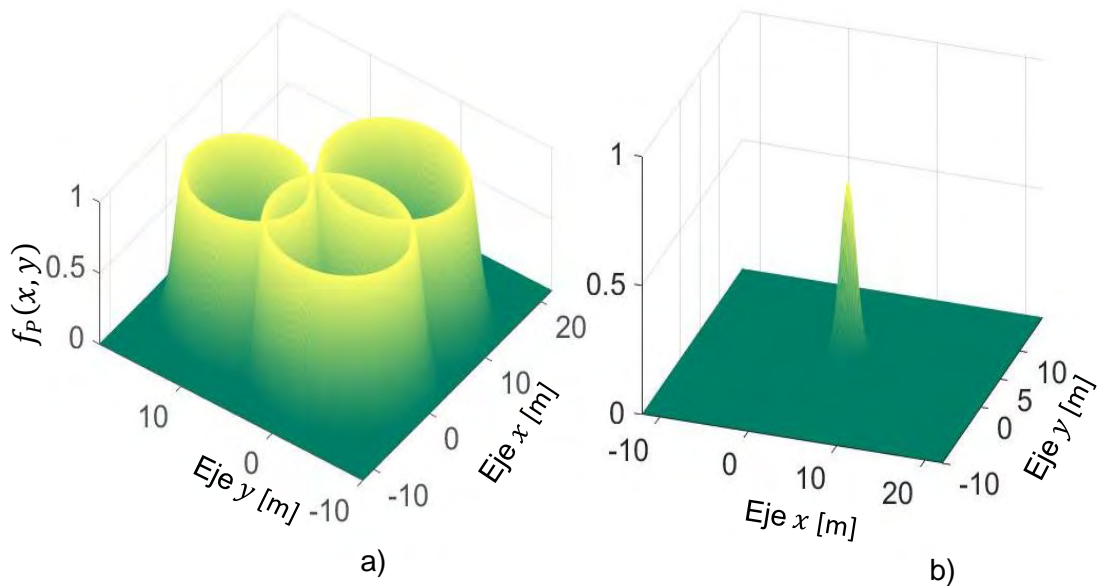
Fuente: elaboración propia.

$$f_{PA}(x, y) = \frac{1}{N_A} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\sqrt{(x-x_A)^2 + (y-y_A)^2} - d_A}{\varepsilon_A} \right)^2} \quad (32)$$

Luego de definir la función de densidad de probabilidad para cada estación transceptora  $f_{Pi}(x, y)$  se debe encontrar el punto de coordenadas  $(x, y)$  sobre el cual es más probable que el objetivo se localice. Ya que, las funciones de densidad de probabilidad para cada estación son independientes entre sí, la función de probabilidad que permite encontrar la posición del objetivo en  $(x, y)$  y que emplea las funciones construidas para cada estación receptora, se define como el producto de todas las funciones de densidad de probabilidad asociadas a cada estación [36]. Dado el conjunto de  $M$  funciones de probabilidad independientes entre sí, la ecuación (33) define un valor para cada punto en el plano que se relación con la probabilidad de que el objetivo se ubique sobre este. En la Figura 13.a se presenta la densidad de probabilidad de tres estaciones  $M = 3$ , en 13.b se ilustra el resultado de la ecuación (33).

$$f_P(x, y) = \prod_{i=1}^M \frac{1}{N_i} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - d_i}{\varepsilon_i} \right)^2} \quad (33)$$

Figura 13. Densidad de probabilidad a) conjunto de tres estaciones b) intersección tres estaciones.



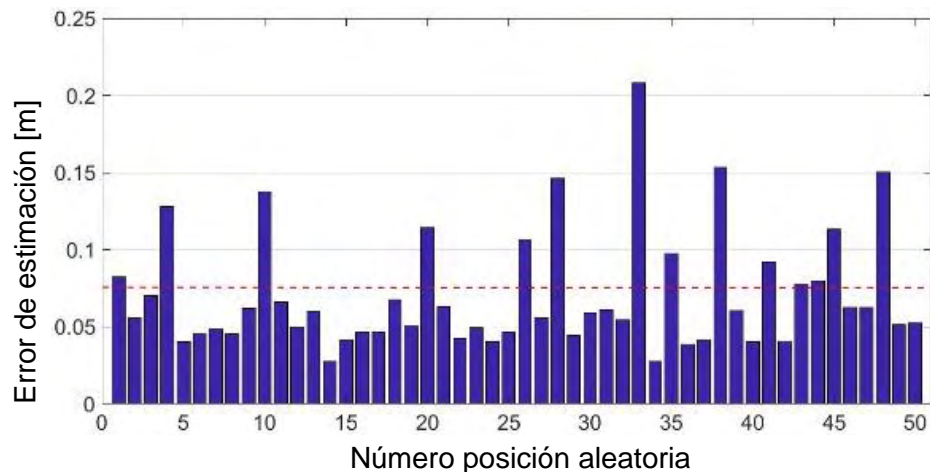
Fuente: creación propia.

Las coordenadas  $(x^*, y^*)$  donde es más probable se localice el objetivo, se consiguen al maximizar (33)  $\max(f_p)$ , Figura 13.b. Este proceso se puede desarrollar a través de métodos heurísticos o iterativos, estos últimos pueden ser finitos o de convergencia. Entre los métodos más empleados se encuentran aquellos que dependen del gradiente, como consecuencia para poder aplicarlos es necesario que la derivada de la función exista y sea continua, su aplicación trae un resultado satisfactorio, pero el costo computacional que exige es elevado. Por otra parte, los métodos heurísticos proveen soluciones aproximadas sin necesidad de contar con una expresión analítica que describa la función y sus derivadas, sin embargo, su comportamiento depende de parámetros aleatorios y en ocasiones puede que no se llegue a una respuesta acertada [37].

Para el escenario propuesto se emplea un algoritmo de optimización por enjambre de partículas, PSO del inglés “*particle swarm optimization*”, es posible emplear este método, ya que, la función a optimizar solo tiene un máximo global y carece de máximos locales como se ilustra en la Figura 13.b, como consecuencia se logra la convergencia al punto de máximo de  $f_p$  después de un número considerable de iteraciones. Además, el gasto computacional es bajo y se consigue una rápida convergencia.

El error en distancia entre la posición real y la estimada con la técnica se presenta en la Figura 14. Nótese que, a pesar de ser incluida una variación con distribución uniforme entre [-30, 30] cm a los rangos estimados por cada estación, la distancia entre la posición real y la estimada se mantiene por debajo de 22 cm, lo que demuestra que la técnica propuesta presenta buenos resultados aun cuando las medidas de las estaciones presenten un mayor error de estimación.

Figura 14. Error de estimación en distancia escenario 1 trilateración probabilística.



Fuente: creación propia.

#### 4.2.2.2. Escenario II

Para el segundo escenario de estudio se emplean dos estaciones receptoras en  $(-10,0)$   $(10,0)$  m, una estación transceptora en  $(0,0)$ m y un objetivo disperso en el área de búsqueda. Las distancias  $d_1$  y  $d_2$  se calculan como la resta entre la distancia total estimada por las estaciones que comprenden el trayecto transmisor – objetivo – receptor  $d_{Rx1}, d_{Rx2}$  y la distancia entre el objetivo y la estación transceptora  $d_{TxRx}$ , como se detalla en la Figura 11. La densidad de probabilidad para la estación transceptora se mantiene como describe la ecuación (33). Calculadas las distancias se procede a ubicar un objetivo en las mismas 50 posiciones anteriores y estimar el error entre sus coordenadas reales y las estimadas con la técnica, los resultados obtenidos se presentan en la Figura 15. Se evidencia que el error es similar al resultante en el escenario anterior presentado en la Figura 14.

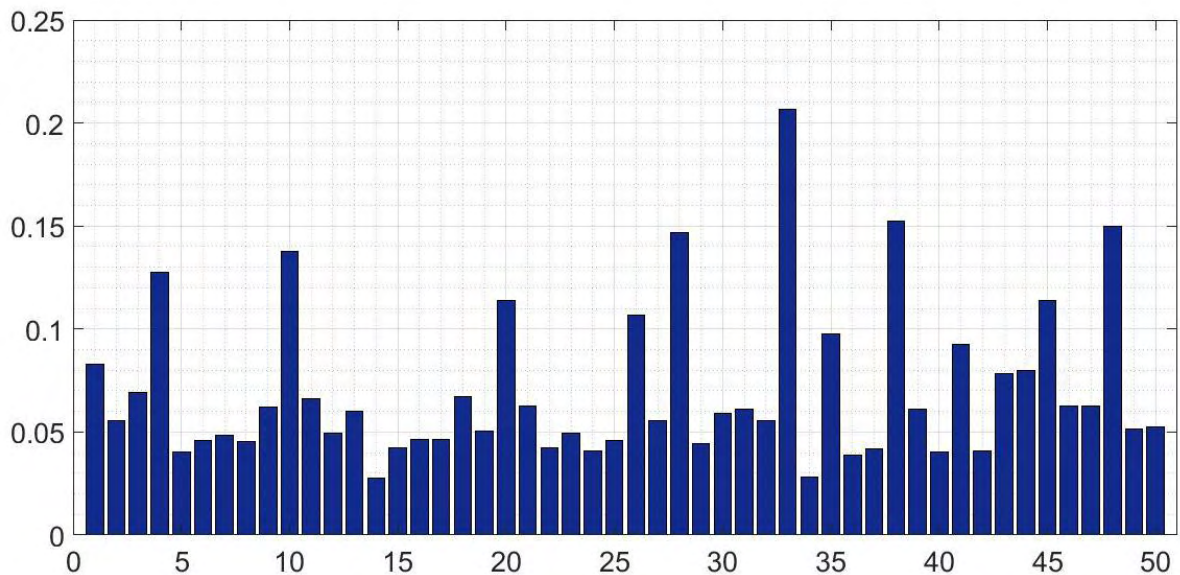


Figura 15. Error en estimación en distancia escenario 2 trilateración probabilística.

Fuente: creación propia.

### 4.3. Extensión a múltiples objetivos

#### 4.3.1. Planteamiento del problema



Se considera un escenario de radar armónico con  $N$  objetivo y  $M$  estaciones. Bajo condiciones ideales, todas las estaciones estiman los rangos de todos los objetivos. Por lo tanto, cada estación guarda un vector correspondiente a las medidas de la distancia entre esta y cada objetivo. Se tiene en la estación  $M$  y en general para cualquier estación un vector de la forma (34), donde  $d_{M1}$  corresponde a la distancia estimada entre la estación  $M$  y el objetivo más cercano a esta, de manera que  $d_{MN}$  es la distancia entre la estación y su objetivo más lejano. Es fácil notar que  $d_{M1} < d_{M2}$  y, de manera general,  $d_{Mi} < d_{M(i+1)}$ . Para cada estación se construyen vectores similares.

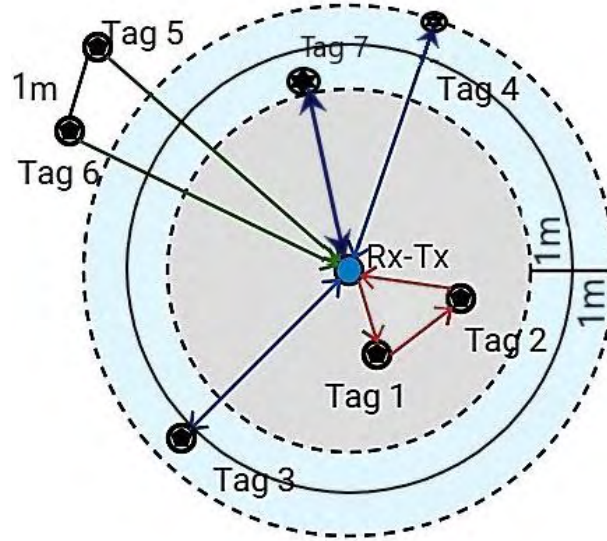
$$d_M = [d_{M1} \quad d_{M2} \quad \dots \quad d_{Mi} \quad d_{M(i+1)} \quad \dots \quad d_{MN}] \quad (34)$$

Para llevar a cabo las técnicas de posicionamiento previamente estudiadas, es necesario contar con mínimo tres distancias estimadas entre las estaciones y el mismo objetivo. En consecuencia, el problema se traslada en seleccionar de cada vector, el rango que corresponde a un mismo objetivo. Luego de ser identificados los rangos correctos, se puede aplicar una técnica de posicionamiento relativo y encontrar para cada  $i$ -ésimo objetivo sus coordenadas  $(x_i^*, y_i^*)$ .

Además de lo planteado, se debe considerar dos situaciones relevantes: en primer lugar, al existir más de un objetivo se presentarán reflexiones no deseadas entre estos, y si se encuentran lo suficientemente cerca de una estación receptora, de manera que la potencia de la reflexión no deseada supere la potencia mínima de recepción, se recibirán ecos con información falsa. Esta situación se ilustra entre los *Tag* 1 y 2 de la Figura 16.

En segundo lugar, el concepto de resolución, previamente definido, afecta la identificación de objetivos que estén separados por distancias menores a la resolución del sistema. Por ejemplo, en la Figura 16 los ecos reflejados por los *Tag* 5 y 6 son detectados como uno solo. Así mismo, el problema de la resolución se extiende a objetivos dispersos pero ubicados en radios que no difieran más de la resolución del sistema, esta situación se ilustra en la Figura 16 y sucede con los *Tag* 3,4 y 7. En conclusión, todos los objetivos ubicados en la región azul serán detectados como uno solo por la estación.

Figura 16. Situaciones no deseadas en un escenario de radar armónico con múltiples objetivos.



Fuente: creación propia.

#### 4.3.2. Solución Trilateración convencional

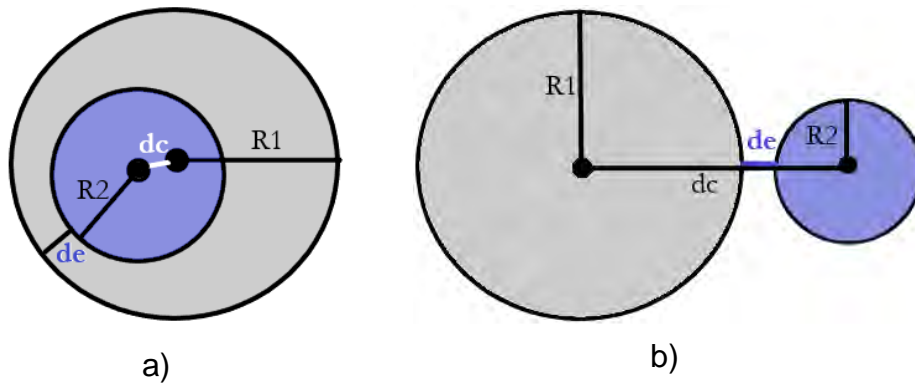
Para encontrar los rangos que permiten estimar las coordenadas de los objetivos, se propone construir un arreglo en el cual cada columna represente una posible combinación para un objetivo. Este arreglo contiene un total de  $M$  filas y  $N^M$  columnas, de las cuales solo  $N$  son correctas. Por ejemplo, en un escenario con tres estaciones transceptoras y dos objetivos, el arreglo asociado corresponde a la matriz que se muestra en (35). La matriz  $C$  tiene un total de 8 combinaciones, de las cuales solo 2 columnas son las combinaciones que permitan estimar las posiciones reales de los objetivos.

Una vez creada la matriz  $C$  el problema se centra en encontrar para que columnas de esta el sistema (30) tiene solución. Sin embargo, como consecuencia de la reducción (31) todas las columnas arrojarán una solución que puede o no satisfacer el sistema de ecuaciones (30), en caso de hacerlo serán consideradas las posiciones correctas.

$$C = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{11} & d_{11} & d_{11} & d_{21} & d_{21} & d_{21} & d_{21} \\ d_{21} & d_{21} & d_{22} & d_{22} & d_{21} & d_{21} & d_{22} & d_{22} \\ d_{31} & d_{32} & d_{31} & d_{32} & d_{31} & d_{32} & d_{31} & d_{32} \end{bmatrix} \quad (35)$$

Para descartar combinaciones incorrectas se propone, en primera instancia, un estudio geométrico del problema; desde este análisis las combinaciones correctas serán aquellas que construyan tres circunferencias que se corten en un punto. Los centros de las circunferencias serán las coordenadas en las que se ubican las estaciones transceptoras y los radios están dados por las componentes del arreglo  $C$ . Sin embargo, como se ha explicado previamente se debe considerar que las medidas estimadas por el radar presentaran errores en sistemas reales, por esta razón las circunferencias trazadas pueden o no cortarse en un único punto. De cualquier modo, es posible descartar aquellas combinaciones que generen situaciones en las cuales no es posible que las circunferencias se corten, ni considerando el error de estimación  $\varepsilon \approx 30$  cm.

Figura 17. Reducción geométrica: circunferencias a) interiores, b) exteriores.



Fuente: creación propia.

Geoméricamente, conociendo los centros y radios de dos circunferencias es posible determinar la posición relativa de una respecto a la otra. Se eliminan las combinaciones que generen circunferencias interiores y exteriores. En las primeras la distancia entre los centros  $d_c$  es menor que la diferencia de los radios ( $R_1 - R_2$ ), mientras en las circunferencias exteriores la distancia entre los centros es mayor que la suma de los radios. Para tener en cuenta la cota de error del sistema se considera que dos circunferencias son interiores Figura 17.a, si  $d_e$  supera el valor  $\varepsilon$ , de forma similar para las exteriores Figura 17.b.

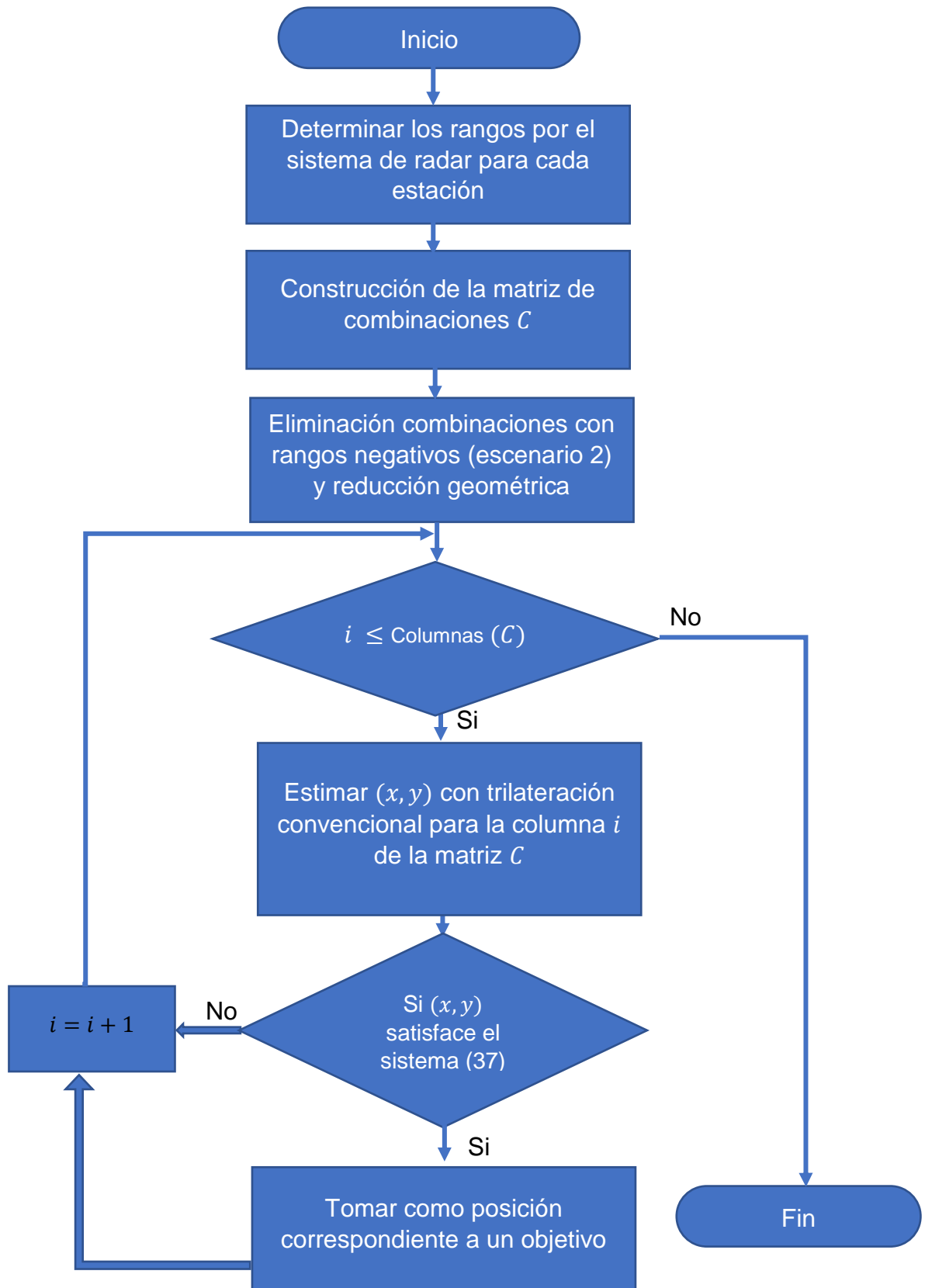
Una vez reducida geoméricamente la matriz  $C$ , la metodología propuesta consiste en obtener las coordenadas  $(x, y)$  para cada columna, por medio de la resolución del sistema de ecuaciones (31). Como criterio para seleccionar las combinaciones que corresponden a cada uno de los objetivos, las coordenadas estimadas deben satisfacer el sistema de ecuaciones (36), el valor del parámetro  $\varepsilon$  se fija en 30 cm.

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 - d_{1i}^2 < \varepsilon \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 - d_{2i}^2 < \varepsilon \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 - d_{3i}^2 < \varepsilon \end{cases} \quad (36)$$

La metodología puede ser aplicada en ambos escenarios propuestos, teniendo en cuenta que, para el escenario 2 los vectores de rangos de cada estación se extienden restando los rangos leídos por la estación transreptora  $d_{RxTx\ i}$  a todas las lecturas de las estaciones receptoras  $d_{Rxji}$  ( $j = 1:M$  y  $i = 1:N$ ). Por ejemplo, en un escenario de dos objetivos, los vectores de los rangos de las estaciones receptoras tendrán la forma (37). Nótese que, los vectores de rango crecen a razón de  $N^2$ , por tanto, las nuevas dimensiones de la matriz  $C$  serán  $(M, N^{2M})$ . En este caso es posible que algunas componentes de los vectores sean números negativos, estos no deben ser tenidos en cuenta. Entonces, el primer paso consiste en eliminar todas las columnas de la matriz  $C$  que contengan valores negativos y luego proceder con la reducción geométrica.

$$\begin{aligned} d_1 &= [d_{Rx11} - d_{RxTx\ 1} \quad d_{Rx12} - d_{RxTx\ 1} \quad d_{Rx11} - d_{RxTx\ 2} \quad d_{Rx12} - d_{RxTx\ 2}] \\ d_2 &= [d_{Rx21} - d_{RxTx\ 1} \quad d_{Rx22} - d_{RxTx\ 1} \quad d_{Rx21} - d_{RxTx\ 2} \quad d_{Rx22} - d_{RxTx\ 2}] \end{aligned} \quad (37)$$

A continuación, se presenta un diagrama que resume la metodología propuesta:



La Figura 18, presenta los resultados de la metodología propuesta aplicada al escenario 1, se ubicaron ocho objetivos dispersos en el área de búsqueda. En este escenario cada estación estima ocho rangos los cuales generan la matriz de combinaciones  $C$  con 512 posibilidades, de las cuales solo ocho son correctas. La metodología propuesta estima ocho objetivos como se detalla en la Figura 18, los rangos con los que fueron estimadas estas posiciones se presentan en la Tabla 5. Sin embargo, se estima un objetivo en las coordenadas  $(-27, -6)$  m que no corresponde a ninguna posición real, esta situación es resultado de una combinación de los rangos generados por los objetivos uno y dos, como se resalta en la Tabla 5.

Objetivo		Rangos							
		1 (5,10)	2 (27,-6)	3 (-16,48)	4 (17,50)	5 (-55,2)	6 (-38,47)	7 (45,50)	8 (-55,-56)
Rangos Estación [m]	1	11.16	27.60	50.56	52.76	55.00	60.40	67.24	78.44
Rangos Estación [m]	2	18.00	37.44	48.32	56.80	45.00	54.68	74.28	71.80
Rangos Estación [m]	3	4.96	31.36	41.20	43.44	55.52	68.48	74.96	85.88

Tabla 5. Combinaciones de rangos correctas obtenidas con la metodología.

Fuente: creación propia.

No se cuenta con un criterio para determinar que las coordenadas adicionales no corresponden a un objetivo real. No obstante, se puede emplear una cuarta estación (estación de verificación), con la cual una vez estimadas todas las posiciones se puede comparar la distancia entre los posibles objetivos y la estación adicional con sus rangos estimados, de esta forma se descartan las coordenadas que generen distancias que no fueron estimadas por la estación de verificación.

La Figura 19, presenta los resultados de aplicar la metodología propuesta en el escenario 2 y con los mismos objetivos del escenario anterior, se muestra que siete objetivos son detectados y uno se hace invisible para el sistema. Esta situación se debe a que en esta configuración de estaciones la diferencia de las distancias leídas por cualquier receptor ( $d_t + d_r$ ) (ver Figura 3) con respecto a dos o más objetivos debe ser mayor que la resolución de sistema. Por otra parte, el

objetivo 5 no es identificado, el receptor 2 asigna la distancia leída para el objetivo 3 a este, de tal manera que al estimar las coordenadas estas no superan la cota de error fijada.

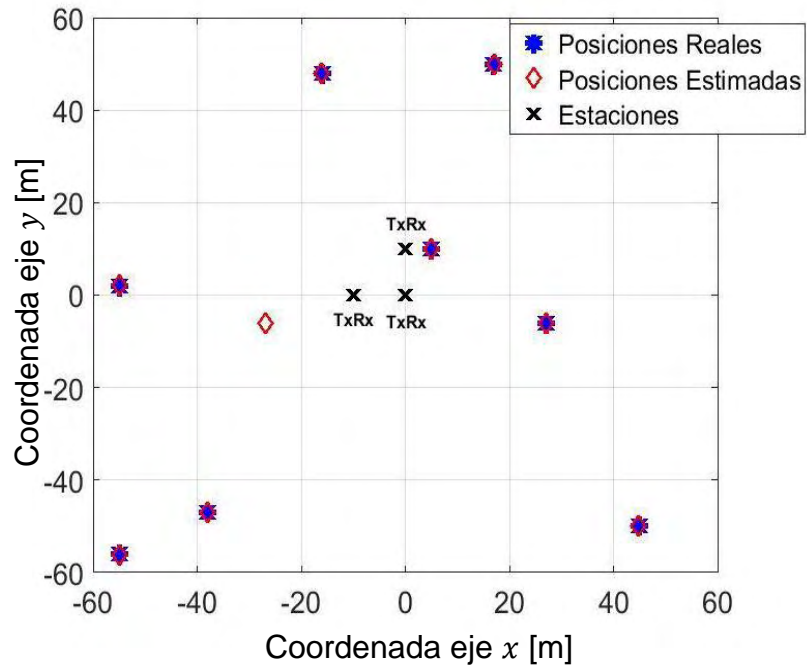
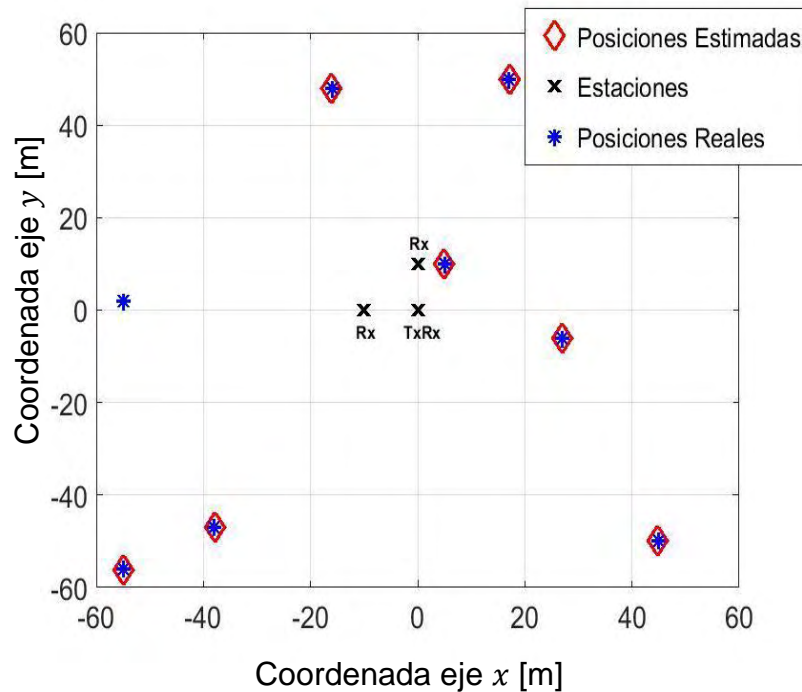


Figura 18. Posiciones reales y estimadas escenario 1 trilateración convencional.

Fuente: creación propia.

Figura 19. Posiciones reales y estimadas escenario 2 trilateración convencional.



Fuente: creación propia.

Como se analizó previamente en el escenario 2 la matriz de combinaciones crece considerablemente, para el experimento presentado de ocho objetivos la matriz contiene un total de  $8^6$  posibilidades de las cuales solo ocho son correctas. La metodología propuesta es capaz de encontrar siete de las combinaciones correctas, sin embargo, el costo computacional, en relación al escenario anterior, es mayor. Así mismo también incrementa la probabilidad, tanto de que se creen objetivos ficticios, como que objetivos reales no sean detectados.

Por otra parte, para evaluar el desempeño de la metodología propuesta en situaciones particulares no deseadas se propone el escenario ilustrado en la Figura 20. Los objetivos o *Tag* se disponen de tal forma que: los rotulados como 1 y 2 reflejan un solo eco a todas las estaciones, por esta razón solo se identifica el más cercano a las tres estaciones. Por otra parte, los *Tag* 3,4,5 y 6 retornan un solo eco a la estación 2, situación similar entre los objetivos 3 y 5 con la estación 3.

En escenarios como el ilustrado en la Figura 20 la identificación de un objetivo depende de la cota de error que se fije al sistema, como consecuencia y teniendo en cuenta la cota de error fijada  $\varepsilon = 0.3$  los objetivos 2, 4 y 5 no serán detectados, esto se debe a que los rangos leídos para los objetivos 4 y 5 presentan un error de aproximadamente 2 m, por otra parte la invisibilidad del objetivo 2 es propia de la resolución del sistema.



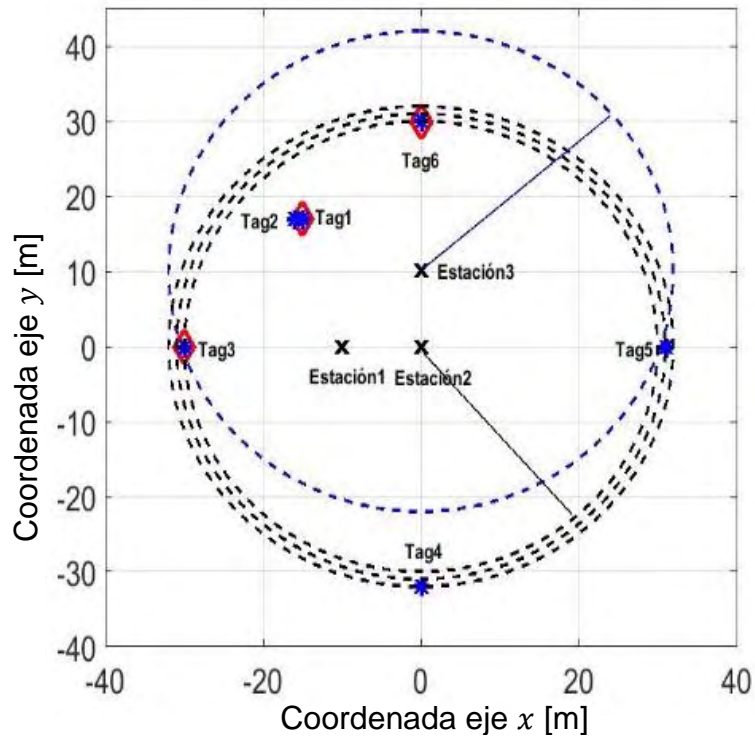


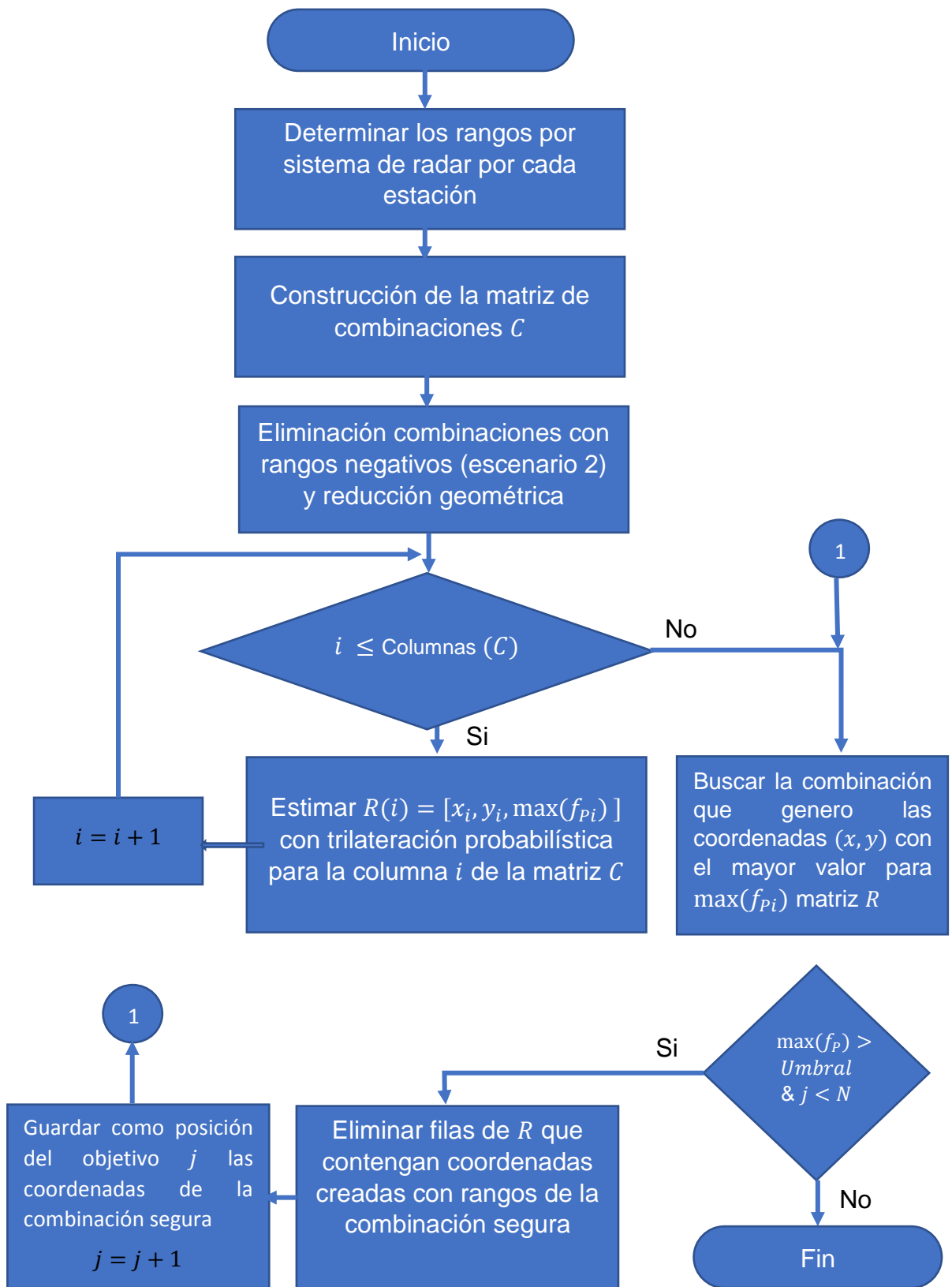
Figura 20. Simulación situaciones no deseadas.

Fuente: creación propia.

#### 4.3.3. Solución Trilateración probabilística

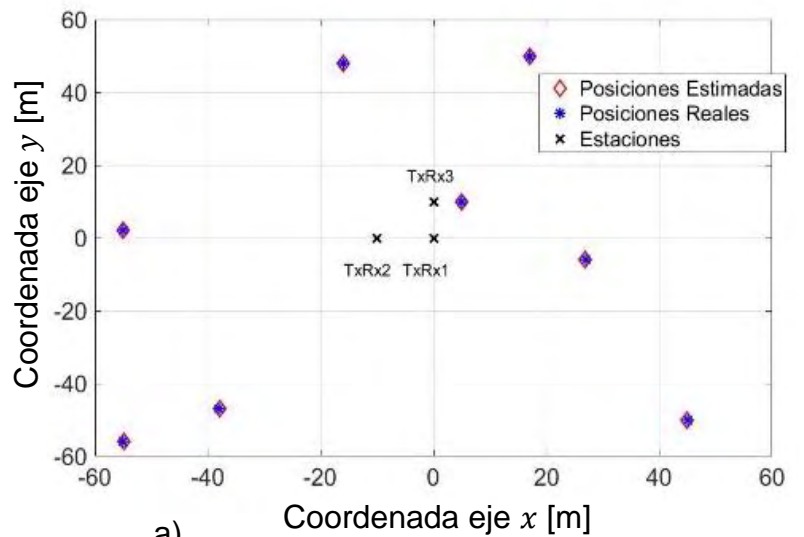
Para extender la técnica de trilateración probabilística presentada en el apartado 4.2.2, se propone la siguiente metodología: una vez construida la matriz de combinaciones de rangos  $C$  y ejecutada la reducción geométrica, se procede a realizar la trilateración probabilística por cada columna para obtener el máximo de la función de densidad de probabilidad (33)  $\max(f_p)$  y las coordenadas  $(x, y)$  donde se encuentra. Teniendo en cuenta que entre mayor sea  $\max(f_p)$  es mayor la probabilidad que el objetivo se ubique en las coordenadas estimadas. Como consecuencia, se toma la combinación con mayor probabilidad como segura y se eliminan todas aquellas que repitan estos rangos. El proceso se repite hasta conseguir la totalidad de los  $N$  objetivos o que el máximo de la función de densidad de probabilidad sea despreciable  $\max(f_p) < Umbral$ , este caso implica que el sistema de radar no detecta el total de objetivos. Por otra parte, sea el caso en el cual el sistema estime un objetivo ficticio, este remplazará un objetivo real. De cualquier manera, con el algoritmo propuesto se estiman como máximo  $N$  objetivos.

A continuación, se presenta un diagrama que resume la metodología propuesta:

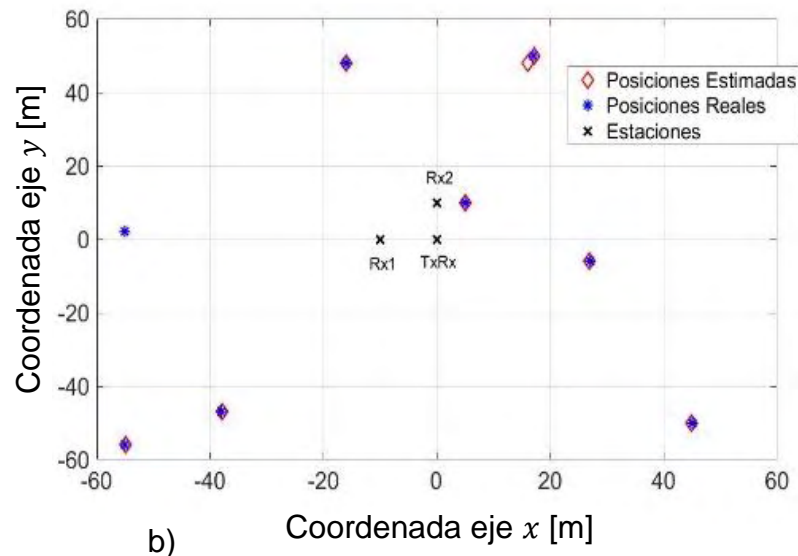


La Figura 21, ilustra los resultados de aplicar la trilateración probabilística extendida a múltiples objetivos, en el experimento de simulación se ubicaron ocho objetivos dispersos en el área segura. La Figura a) presenta el desempeño de la técnica en el escenario 1, se observa que la totalidad de los objetivos es identificada. Por el contrario, para el escenario 2 no se logró la estimación de un objetivo y fue generado uno adicional como se verifica en la imagen b).

Figura 21. Resultados trilateración probabilística múltiples objetivos a) escenario I



a)



b)

b) escenario II.

Fuente: creación propia.

Tabla 6. Coordenadas estimadas y probabilidad asignada escenario 1 y 2.

Objetivo	Escenario 1			Escenario 2		
	$x$	$y$	$\max(f_p)$	$x$	$y$	$\max(f_p)$
(5,10)	4.8930	10.2938	0.9751	4.9626	9.9991	0.9981
(27,-6)	27.1313	-5.7751	0.9389	26.9386	-5.8722	0.9797
(-16,48)	-16.3787	47.9520	0.9244	-16.3145	47.9373	0.9274
(17,50)	15.6296	50.6421	0.9777	17.1270	49.9093	0.9867
(-55,2)	-55.0646	2.8273	0.9328	-	-	-
(-38,47)	-39.8427	-45.7694	0.9923	-37.9073	-47.0257	0.9997
(45,50)	44.9510	-50.1267	0.9115	44.9320	-50.5289	0.9874
(-55,-56)	-57.3448	-53.9555	0.9990	-54.8550	-52.0705	0.9997
				16.0210	47.9556	0.996

Fuente: creación propia.

La Tabla 6 presenta las coordenadas estimadas y los máximos  $\max(f_p)$  asociada a cada uno de los objetivos en ambos escenarios. En el escenario 1 los objetivos generan los 8 máximos de la función de densidad de probabilidad más altos. Por el contrario, en el escenario 2 una de las 8<sup>6</sup> combinaciones genera un máximo mayor para un objetivo ficticio que evita que la metodología propuesta encuentre un objetivo real como se evidencia en la Figura 21 y se resalta en la Tabla 6.

#### 4.4. Extensión a múltiples objetivos móviles

##### 4.4.1. Modelado y simulación del desplazamiento de insectos

El sistema presentado hasta el momento permite posicionar múltiples objetivos estáticos. En esta sección se extienden las técnicas a objetivos móviles, con el propósito de aplicar el sistema al monitoreo de insectos. Por lo anterior, se ve necesario establecer un modelo que aproxime el desplazamiento de estas especies y así emular un ambiente más cercano a la realidad.

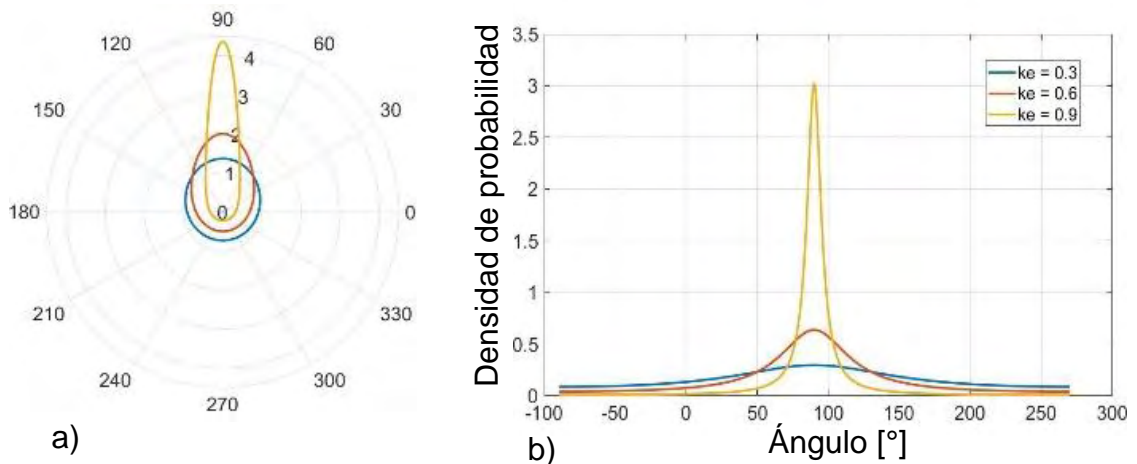
Los animales y en particular los insectos, tienden a adoptar diferentes comportamientos de movimientos que depende de un sin número de factores; la especie, la capacidad individual, la interacción entre miembros, factores del ambiente, entre otros [38], [39]. Encontrar un modelo general que represente el movimiento de las diferentes especies de insectos en diferentes escenarios, no es posible. Sin embargo, el tema ha sido ampliamente estudiado y según la literatura es común aproximar su desplazamiento mediante caminatas aleatorias [40]–[45].

El modelo más sencillo de una camita aleatoria, representa un modelo de difusión. En el cual el movimiento de una partícula se consigue con una serie de pasos en los cuales su longitud y dirección son independientes de pasos anteriores [41]. Sin embargo, un modelo más aproximado tiene en cuenta la influencia de los pasos anteriores y un sesgo global direccional, generando así una caminata aleatoria correlacionada sesgada (BCRW).

Para establecer una caminata aleatoria en el escenario de simulación, se establece que un individuo puede moverse en cualquier dirección  $\varphi$  en el círculo unitario y se recurre a la distribución circular “*wrapped Cauchy*” [40], su función de densidad de probabilidad se detalla en la ecuación (38). Donde,  $\bar{\varphi}$  corresponde al valor medio y  $k_e$  es un factor de escala que toma valores entre cero y la unidad, para valores cercanos a cero la función de densidad de probabilidad tiende a ser uniforme y para valores cercanos a uno se comporta de forma concentrada en el valor medio. En la Figura 22, se ilustra la forma geométrica en coordenadas polares y la función de densidad de probabilidad de la distribución de *wrapped Cauchy*, para un valor medio de  $\bar{\varphi} = \frac{\pi}{2}$  y diferentes valores de  $k_e$ .

$$f(\varphi) = \frac{1 - k_e^2}{2\pi(1 + k_e^2 - 2k_e \cos(\varphi - \bar{\varphi}))} \quad (38)$$

Figura 22. Distribución “*Wrapped Cauchy*” a) Forma geométrica de la función representación polar b) Función de densidad de probabilidad.



Fuente: creación propia.

La función de distribución acumulativa para la densidad de probabilidad (38), se presenta en la ecuación (39) y se ilustra en la Figura 23. Los ángulos aleatorios se generan con la relación matemática (40) que se obtiene al establecer  $\varphi$  en función

de los de más parámetros,  $RN$  corresponde a un número aleatorio de probabilidad uniforme en el intervalo  $[0,1]$ .

$$F(\varphi) = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{1 + k_e}{1 - k_e} \tan \left( \frac{\varphi}{2} \right) \right) + \frac{1}{2} = RN \quad (39)$$

$$\varphi = 2 \tan^{-1} \left( \frac{1 - k_e}{1 + k_e} \tan \left( \pi RN - \frac{\pi}{2} \right) \right) + \bar{\varphi} \quad (40)$$

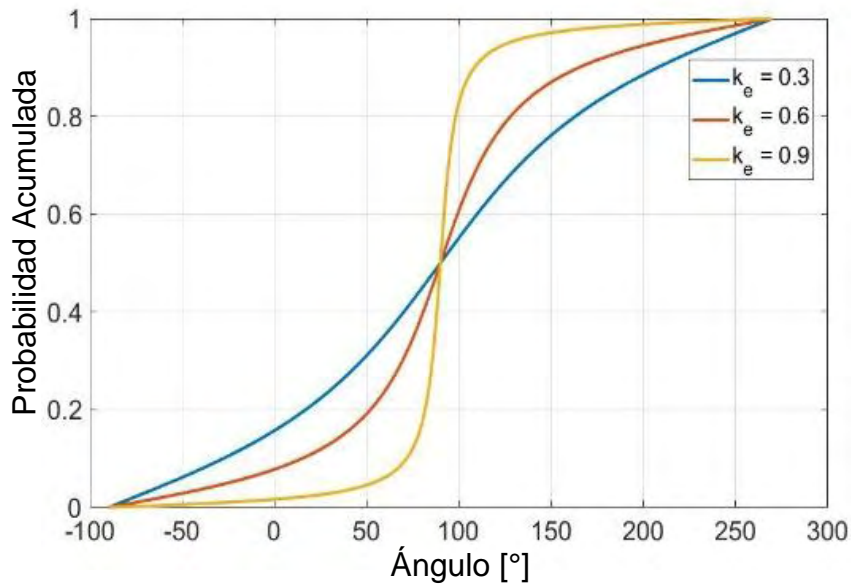


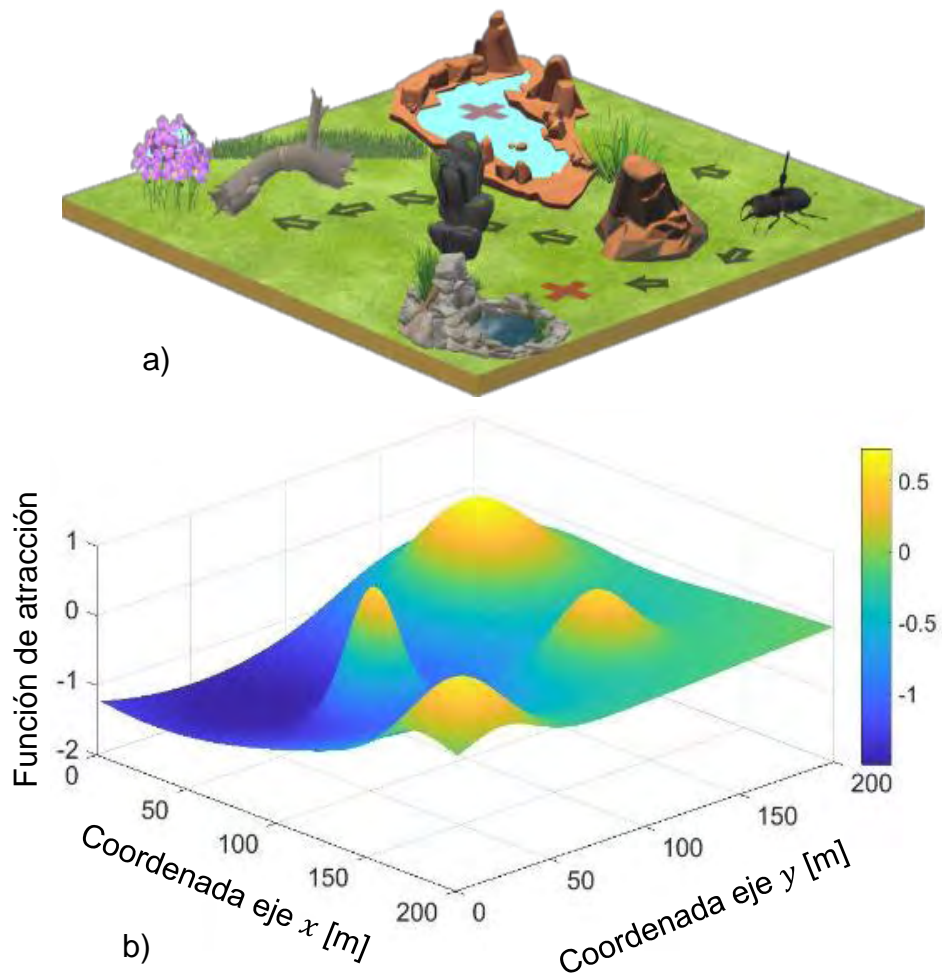
Figura 23. Función de probabilidad acumulada “Wrapped Cauchy”.

Fuente: creación propia.

Para efectos de simulación se considera un ambiente como el ilustrado en la Figura 24, en a) se ilustra un esquema simple de un posible ambiente por el cual se movería un insecto (escarabajo). En él se presentan diferentes zonas, unas por las cuales no es posible el desplazamiento, otras en las cuales se moverá con dificultad y una zona objetivo a la cual el insecto desea llegar. En b) se presenta la función de atracción asociada al terreno, las regiones de color amarillo representan las zonas de repulsión, en contraste el color azul representa las regiones de atracción.

La función asociada al terreno permite agregar un sesgo global direccional, teniendo en cuenta que la media direccional  $\bar{\varphi}$  del siguiente paso se asigna en el sentido en el cual se máxima la atracción. A partir del valor medio se genera la siguiente dirección con la distribución de *Wrapped Cauchy* (40) fijando  $k_e$  y el tamaño del paso a un valor constante. Para  $k_e = 0.45$  y un paso constante de 2 m las caminatas aleatorias resultantes para cuatro individuos se muestran en la Figura 25. Se puede notar que cada individuo comienza desde un punto diferente y después de una cantidad de pasos todos llegan a la zona de mayor atracción. Cabe resaltar que, si se genera nuevamente la caminata manteniendo las posiciones iniciales, los trayectos serán diferentes a los observados, sin embargo, con la cantidad de pasos suficientes siempre llegarán a la zona de convergencia.

Figura 24. Ambiente de simulación a) esquema b) función de atracción asociada.



Fuente: creación propia.





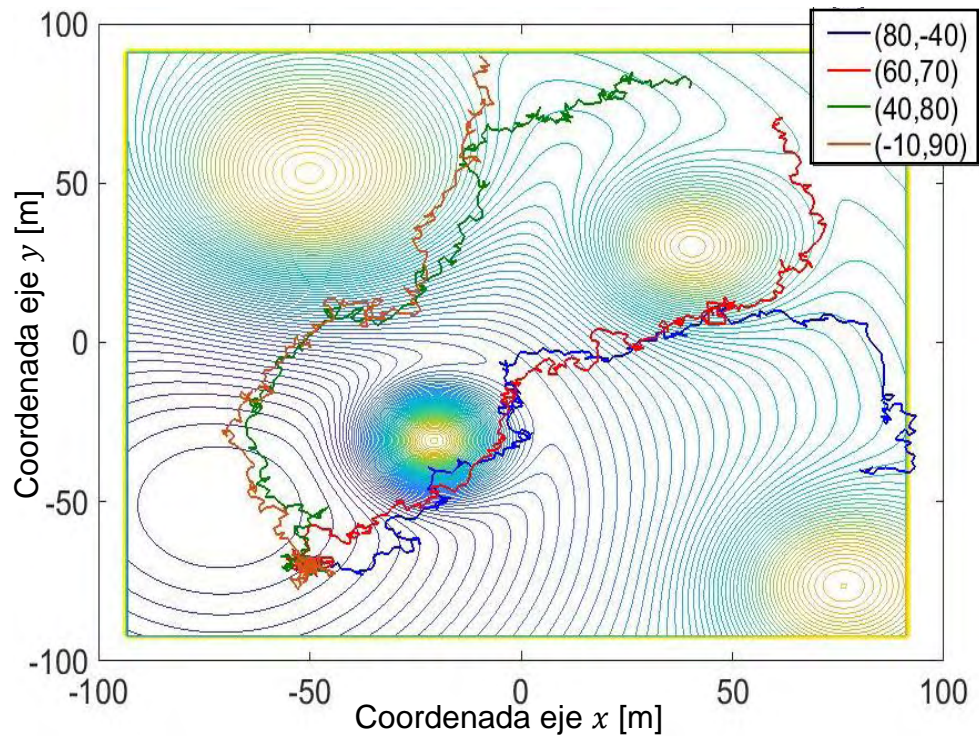


Figura 25. Caminatas aleatorias cuatro individuos.

Fuente: creación propia.

#### 4.4.2. Estimador Kalman y algoritmo de asociación

Para lograr un trazado de trayectos por cada objetivo es necesario identificar que posiciones estimadas pertenecen al mismo. El problema se traslada a encontrar la asociación correcta de las diferentes coordenadas estimadas por el radar con la trayectoria adecuada. Se requieren dos procesos para la solución: una etapa predictiva y un algoritmo de asociación de datos. Para la predicción se propone un estimador Kalman y un método de asociación es el algoritmo Húngaro también conocido como algoritmo de *Munkres* [46]–[49].

Considerando que el movimiento realizado por el individuo entre dos pasos consecutivos se aproxima a un movimiento rectilíneo uniforme en ambas coordenadas, el sistema que rige el desplazamiento en el plano en tiempo discreto con un tiempo de muestreo  $T_s$  se presenta en la ecuación (41), donde  $v_x, v_y$  corresponden a las velocidades en las coordenadas  $x$  y  $y$  respectivamente.

$$(41)$$

$$\begin{cases} x_k = x_{k-1} + v_x T_s \\ y_k = y_{k-1} + v_y T_s \end{cases}$$

Definiendo el vector de estados como  $p = [x, y, v_x, v_y]^T$  se construyen las ecuaciones del estimador Kalman como se detallan en (42). La ecuación del proceso depende de los estados, el ruido del proceso  $w_{k-1}$  y la matriz de transición  $A$ , las variables estimadas  $z_k$  dependen del ruido de medida  $v_k$  y de la matriz  $H$ . Los valores particulares de las matrices  $A$  y  $H$  para el sistema de ecuaciones (41), teniendo en cuenta el vector de estados  $p$ , se detallan en (43).

$$\begin{aligned} p_k &= Ap_{k-1} + w_{k-1} \\ z_k &= Hp_k + v_k \end{aligned} \quad (42)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T_s & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T_s \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (43)$$

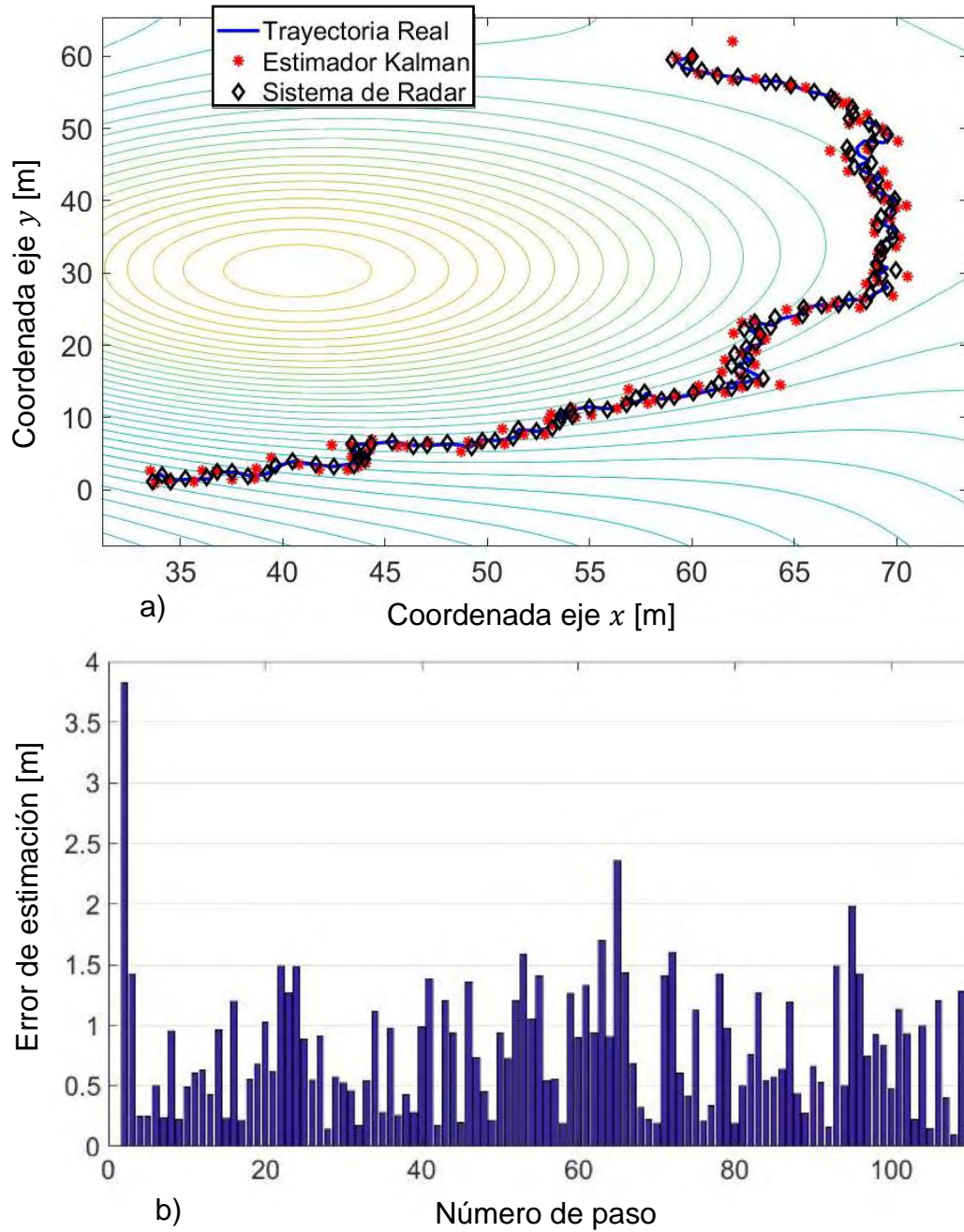
Una vez establecidas las ecuaciones (42) el procedimiento para la estimación consiste en realizar la predicción a priori de los estados  $\widehat{p}_k^- = A\widehat{p}_{k-1}$ , luego se obtiene la matriz de covarianza del error estimada a priori  $S_k^- = AS_{k-1}A^T + Q$ , donde  $Q$  corresponde a la potencia del ruido del proceso. Finalizada la etapa de predicción se realiza la corrección, para esto se calcula la ganancia de Kalman  $K$  con la ecuación (44), donde  $R$  es la potencia del ruido de medida. La ganancia permite corregir la matriz de correlación del error y los estados estimados, como se presenta en las ecuaciones (45) y (46), respectivamente. El valor de  $z_k$  son las coordenadas estimadas por el radar [48].

$$K_k = S_k^- H^T (HS_k^- H^T + R)^{-1} \quad (44)$$

$$\widehat{p}_k = \widehat{p}_k^- + K_k(z_k - H\widehat{p}_k^-) \quad (45)$$

$$S_k = (I - K_k H)S_k^- \quad (46)$$

Figura 26. Estimador Kalman a) camino real y coordenadas estimadas b) error de



estimación.

Fuente: creación propia.

La Figura 26 ilustra los resultados del sistema completo (radar, posicionamiento y estimador Kalman) para un objetivo que realiza una caminata aleatoria de 110 pasos, con un tamaño de paso constante a 1 m y un tiempo de muestreo de 2 s.

En la Figura a) se detalla el camino real, las posiciones estimadas por el radar y el valor estimado por el predictor Kalman, se puede observar que estos valores se asemejan a la trayectoria real del objetivo con un error de estimación que se presenta en la Figura b), en el primer paso este siempre será mayor, debido a que en este no es posible realizar la etapa de corrección del estimador Kalman. Para pasos posteriores la corrección se realiza a partir de las coordenadas estimadas por el radar y se encuentra un error menor a 2 m.

En un escenario de múltiples objetivos; una vez encontradas las coordenadas por el sistema de radar, las posiciones estimadas por el filtro Kalman  $\widehat{p}_k$  permiten asociar cada medida con el objetivo correspondiente, para este fin se propone el algoritmo de asociación de datos conocido como *Munkres* [50], [51]. El primer paso para ejecutar el algoritmo consiste en construir la matriz de costos de asignación  $M_c$ . La ecuación (47) muestra su forma, *Obj* corresponde al total de objetivos y *Tag* son los objetivos estimados por el sistema de radar. Las componentes de la matriz se consiguen a partir de las distancias dadas por la relación (48), donde  $e_{ij}$  es el vector de diferencias entre la  $i$  – ésima posición real estimada por el radar y el  $j$  – ésimo valor predicho con el filtro Kalman. Por otra parte, la matriz de covarianza residual se obtiene a partir del filtro Kalman como  $S_H = HS_kH^T + R$ .

$$M_c = \begin{matrix} & \begin{matrix} Obj1 & Obj2 & \dots & ObjN \end{matrix} \\ \begin{matrix} Tag1 \\ Tag2 \\ \vdots \\ TagN_d \end{matrix} & \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1N} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N_d1} & d_{N_d2} & & d_{N_dN} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (47)$$

$$d_{ij} = e_{ij}'S_H^{-1}e_{ij} \quad (48)$$

Con la matriz de costos  $M_c$ , el algoritmo de Munkres realiza la asignación de cada par de coordenadas estimadas por el radar al objetivo más óptimo, de tal forma que se minimice la distancia total sumada entre todos los pares asignados [50]. Finalizado el proceso de asociación se encuentra la medida  $z_k$  correspondiente a cada objetivo, la cual permite realizar la corrección de los estados estimados del predictor Kalman (45) y trazar la trayectoria del desplazamiento de cada individuo.

La Figura 27.a, muestra los resultados obtenidos para 2 objetivos que realizan caminatas aleatorias de 50 pasos en los cuales las posiciones fueron detectadas en su totalidad. Se evidencia como la combinación del predictor Kalman con el

algoritmo de asociación Munkres permite construir los trayectos individuales. En b) se presentan los resultados para 3 objetivos con 150 pasos de los cuales se presentan objetivos adicionales y momentos sin estimación. El algoritmo asigna las coordenadas estimadas por el sistema de radar al objetivo correspondiente, cuando el sistema de radar estima coordenadas adicionales alejadas de las trayectorias el algoritmo propuesto desprecia estos valores. Por otra parte, cuando un objetivo no es detectado por el sistema el algoritmo le asignará el valor predicho por el estimador Kalman. Sin embargo, si el sistema de radar no detecta el objetivo durante varios pasos el predictor no tendrá medida de corrección y como consecuencia el error de predicción crecerá considerablemente haciendo que el valor predicho pierda relación con la trayectoria real.

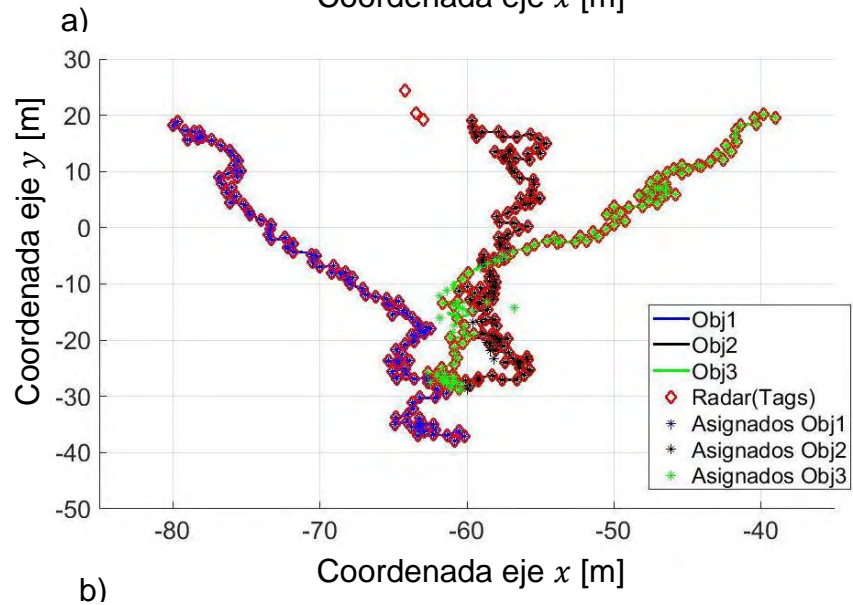
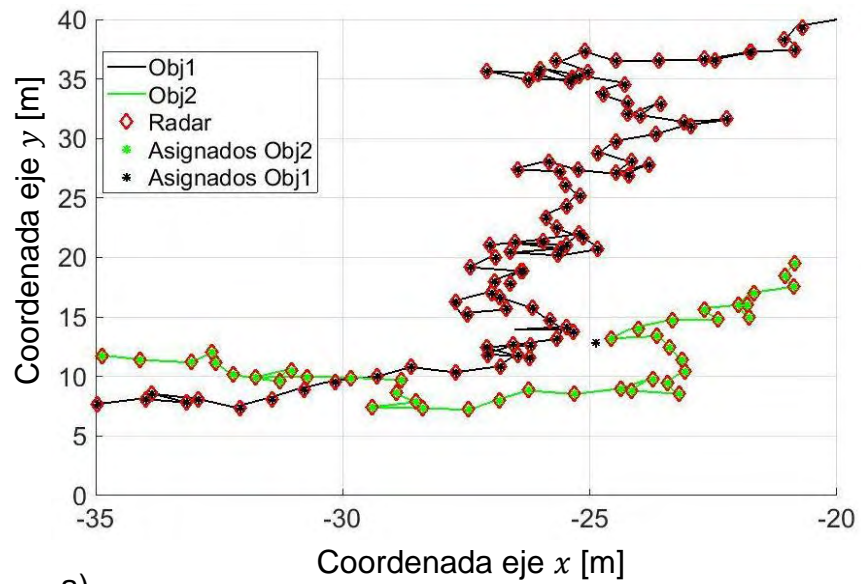


Figura 27. Predictor Kalman y asignación de coordenadas Munkres.

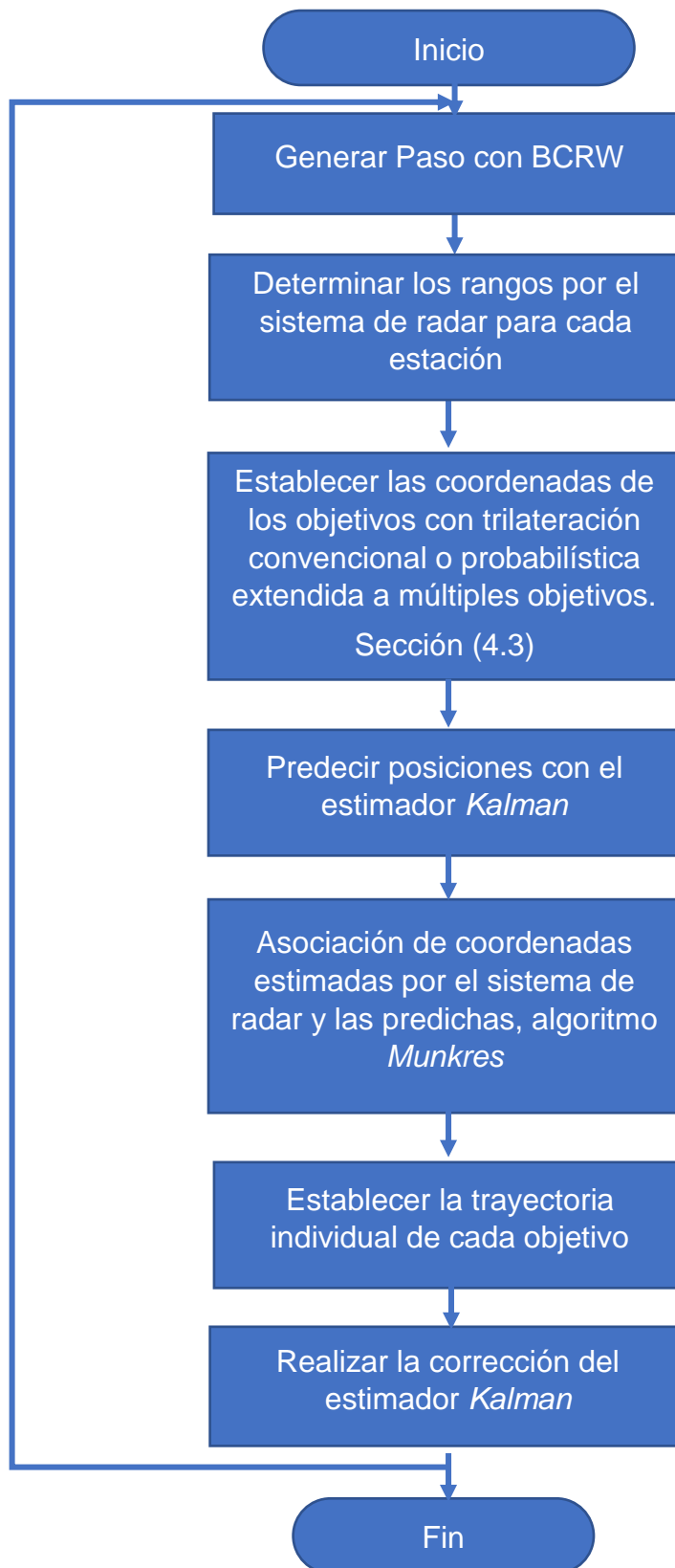
Fuente: creación propia.

## 5. RESULTADOS SISTEMA COMPLETO

La metodología propuesta establece una técnica de posicionamiento para caracterizar el desplazamiento de varios transpondedores móviles en un sistema de radar armónico. En esta sección se presentan los resultados de aplicar la técnica desarrollada en diferentes situaciones para caminatas aleatorias (BCRW) estudiadas en la sección 4.4.1, que permiten validar su correcto funcionamiento. Se incluyen las dos técnicas de posicionamiento previamente estudiadas en 4.3 trilateración convencional y probabilística, en un escenario de tres estaciones transceptoras. Para las caminatas se tomó un paso constante de 1 m y un tiempo de muestreo de 2 s.

Para evaluar la metodología, se plantean tres situaciones claves que suceden en un ambiente real. La primera, cuando las trayectorias de los objetivos no se cruzan. En la segunda situación, se analizan los resultados de la metodología propuesta, cuando las trayectorias de los objetivos se cruzan, pero no coinciden en el mismo tiempo y espacio. Por último, se presenta el escenario en el cual las trayectorias de los objetivos se cruzan de tal forma que coinciden en tiempo y espacio.

La secuencia de pasos que permite el trazado de trayectorias individuales para cada objetivo en el sistema de radar armónico se resume en el siguiente diagrama:





Para el primer experimento se generan 3 caminatas aleatorias BCRW comenzando en las posiciones  $(60,60)$ ,  $(0,80)$ ,  $(-60,60)$  m para un total de 150 pasos. La Figura 28 ilustra los resultados obtenidos, en a) se presentan los resultados de aplicar la metodología propuesta con la técnica de trilateración convencional y en b) se aplica trilateración probabilística. En ambos casos se puede evidenciar que mientras los trayectos de los objetivos mantengan distancia entre ellos, la metodología propuesta realiza una buena aproximación del desplazamiento de cada uno

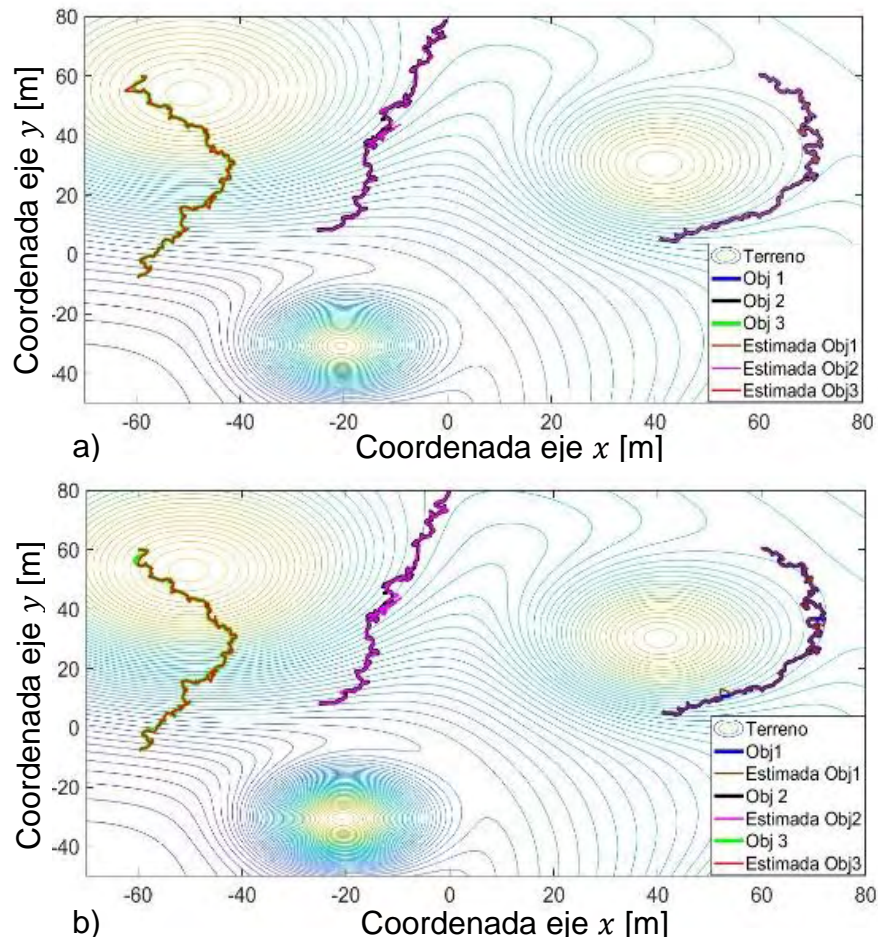


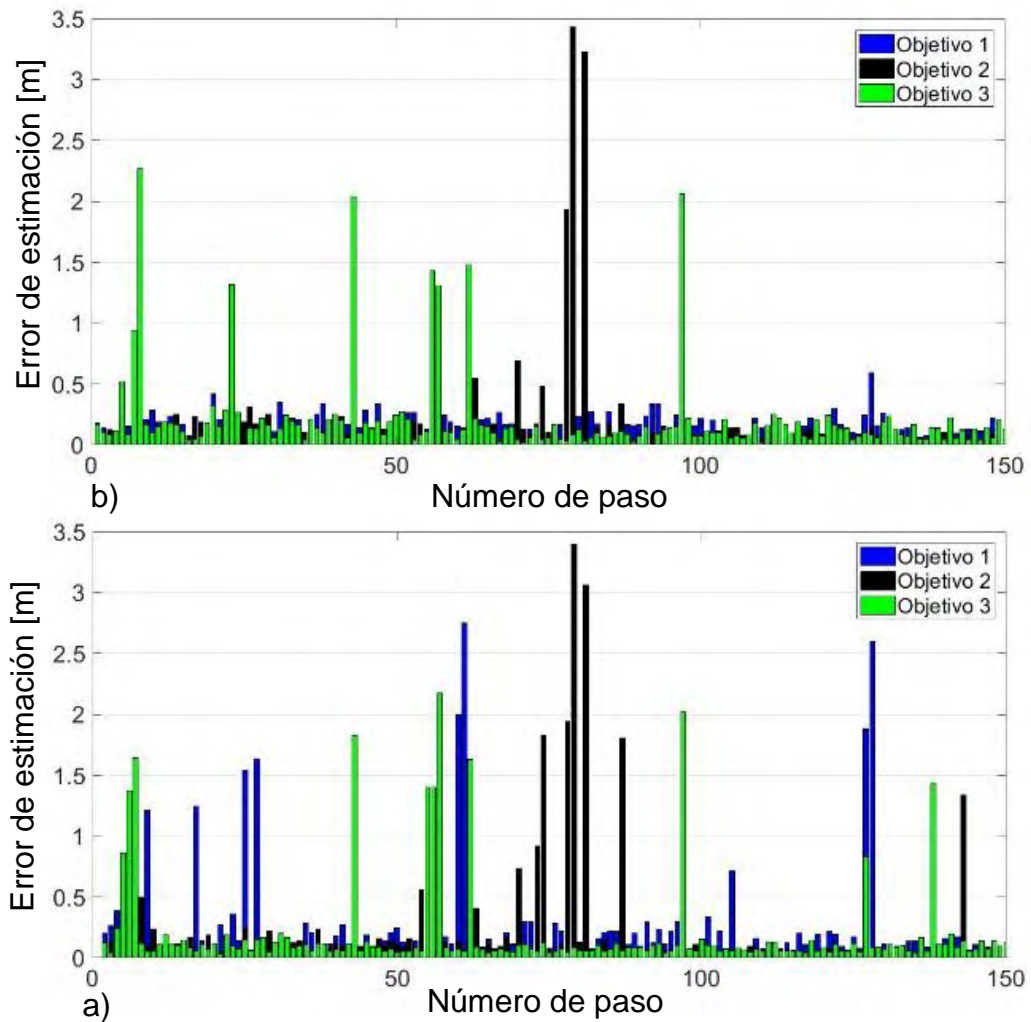
Figura 28. Resultados 3 objetivos separados a) convencional b) probabilística.

Fuente: creación propia.

La Figura 29, muestra el error entre la caminata real y la asignada por el sistema, de trayectorias anteriores. Las barras de error más altas se producen cuando el objetivo no es detectado por el sistema de radar y se le asigna el valor estimado, el error aumenta entre más pasos consecutivos no sean detectados. El

caso anterior sucede más a menudo en la trilateración probabilística, esto se debe a que esta técnica permite encontrar como máximo la totalidad de los objetivos y cuando la probabilidad no es suficiente, las coordenadas encontradas son despreciadas para evitar generar falsos positivos. Debido a lo anterior, el error de esta técnica presentado en la Figura 29.b es mayor si se compara con la técnica convencional ilustrada en la Figura 29.a.

Figura 29. Errores de estimación 3 objetivos separados a) convencional b) probabilística.

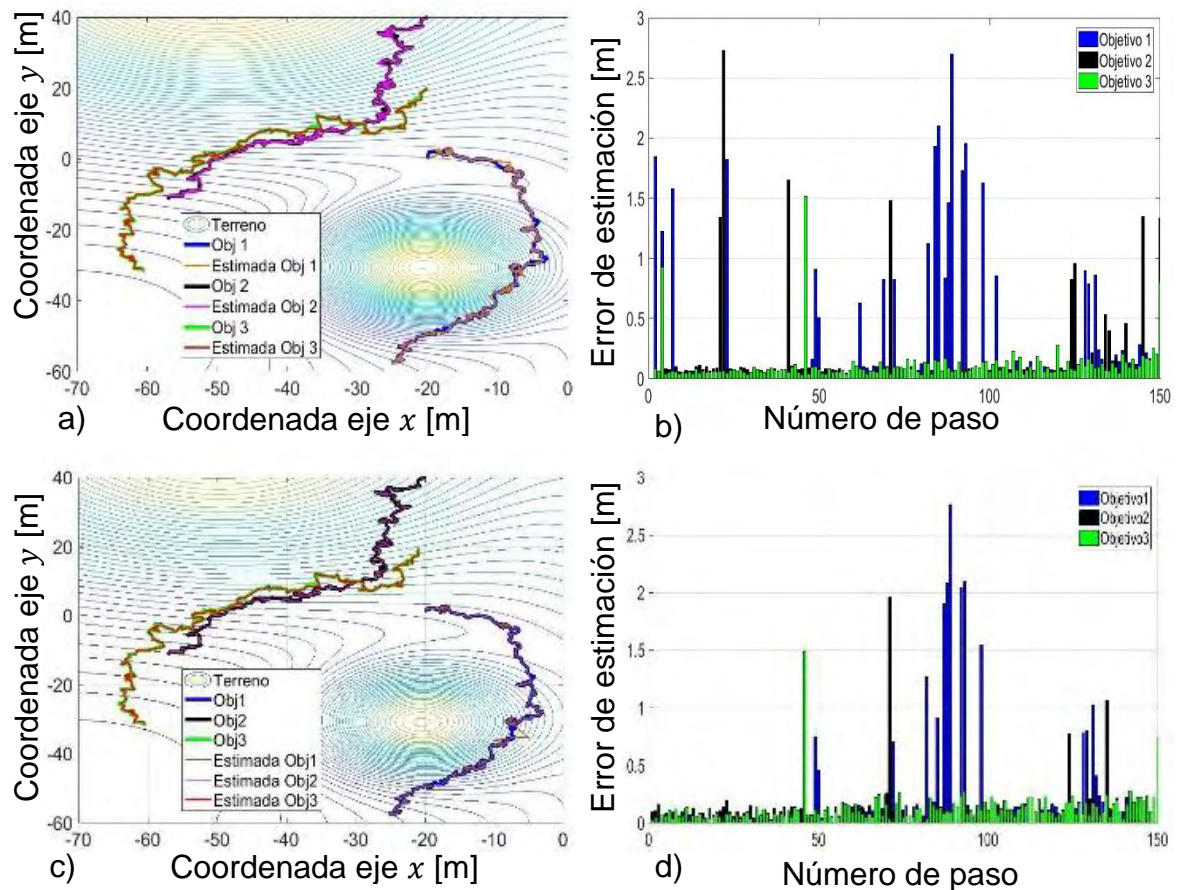


Fuente: creación propia.

La Figura 30 muestra los resultados de aplicar la metodología propuesta a 3 caminatas aleatorias BCRW de 150 pasos y con posiciones iniciales  $(-20,0)$ ,  $(-20,40)$ ,  $(-20,20)$  m. Se puede detallar que las trayectorias de los objetivos 3 y 4 se cruzan; sin embargo, se evidencia que mientras las trayectorias no se crucen

en el mismo tiempo y espacios que no difieran más de la resolución del sistema, el algoritmo logra trazar los trayectos individuales sin dificultad. Los resultados se presentan en a) para la trilateración probabilística y c) para la convencional, los errores entre la trayectoria asignada por el algoritmo y la real se presentan en b) para la trilateración probabilística y d) para la convencional.

Figura 30. Resultados cruces entre objetivos a) probabilística c) convencional,



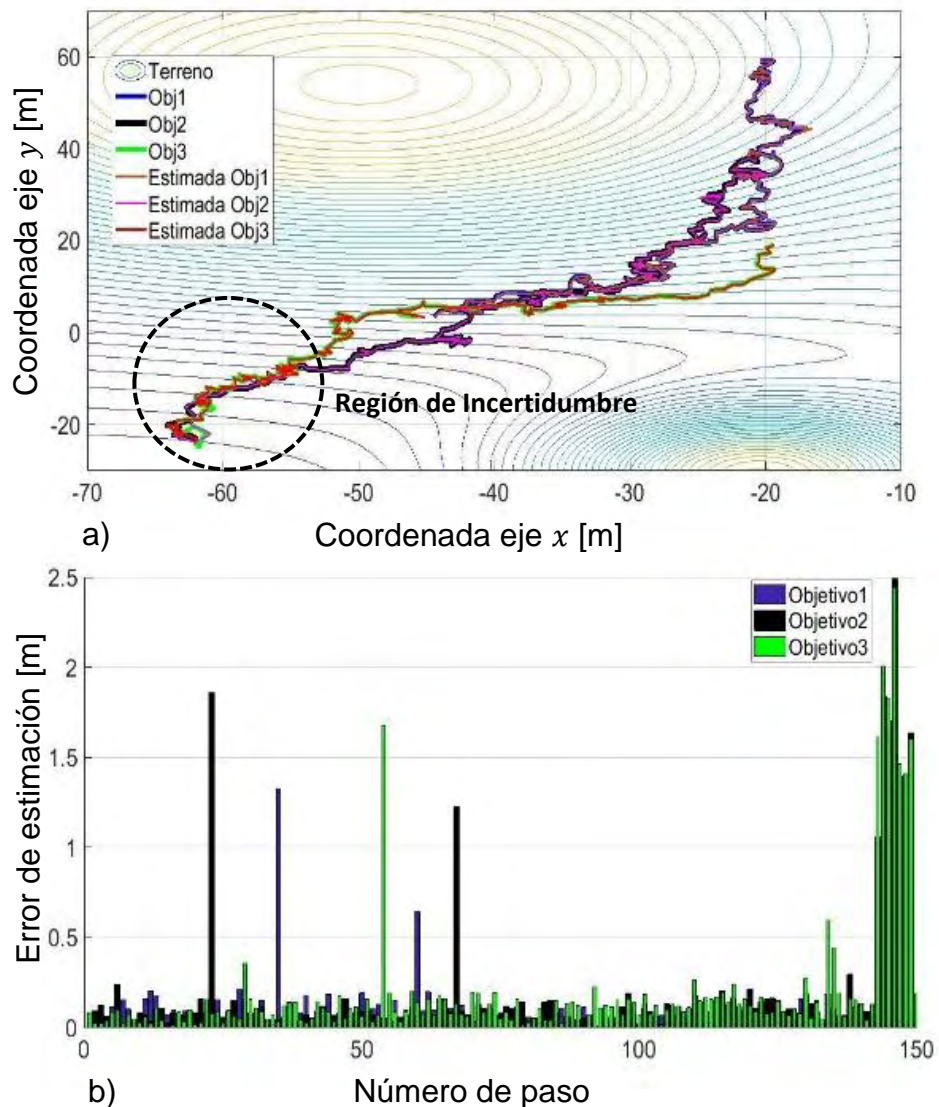
errores de estimación b) probabilística d) convencional.

Fuente: creación propia.

La Figura 31.a, presenta 3 caminatas aleatorias de 150 pasos, se ejecuta la metodología propuesta con la técnica de trilateración convencional. Se puede notar que, al finalizar el recorrido los objetivos 2 y 3 se aproximan entre ellos coincidiendo en tiempo y espacio. Debido a esto se genera una zona de incertidumbre, en la cual no es posible identificar una trayectoria de la otra, al confundirse las dos trayectorias el error de estimación en las posiciones finales para estos dos objetivos es mayor, como se detalla en la Figura 31.b. El

crecimiento del error de asignación es consecuencia de que el sistema asocia en varias ocasiones las posiciones del objetivo 2 al objetivo 3 y/o viceversa. Además, debido al concepto de resolución del sistema previamente estudiado cuando los dos objetivos están lo suficientemente cerca es común que uno se haga invisible para el sistema, lo que conlleva a incrementar el error de estimación del predictor Kalman.

Figura 31. Resultados cruces entre objetivos región de incertidumbre técnica de posicionamiento trilateración convencional: a) trayectorias b) errores de

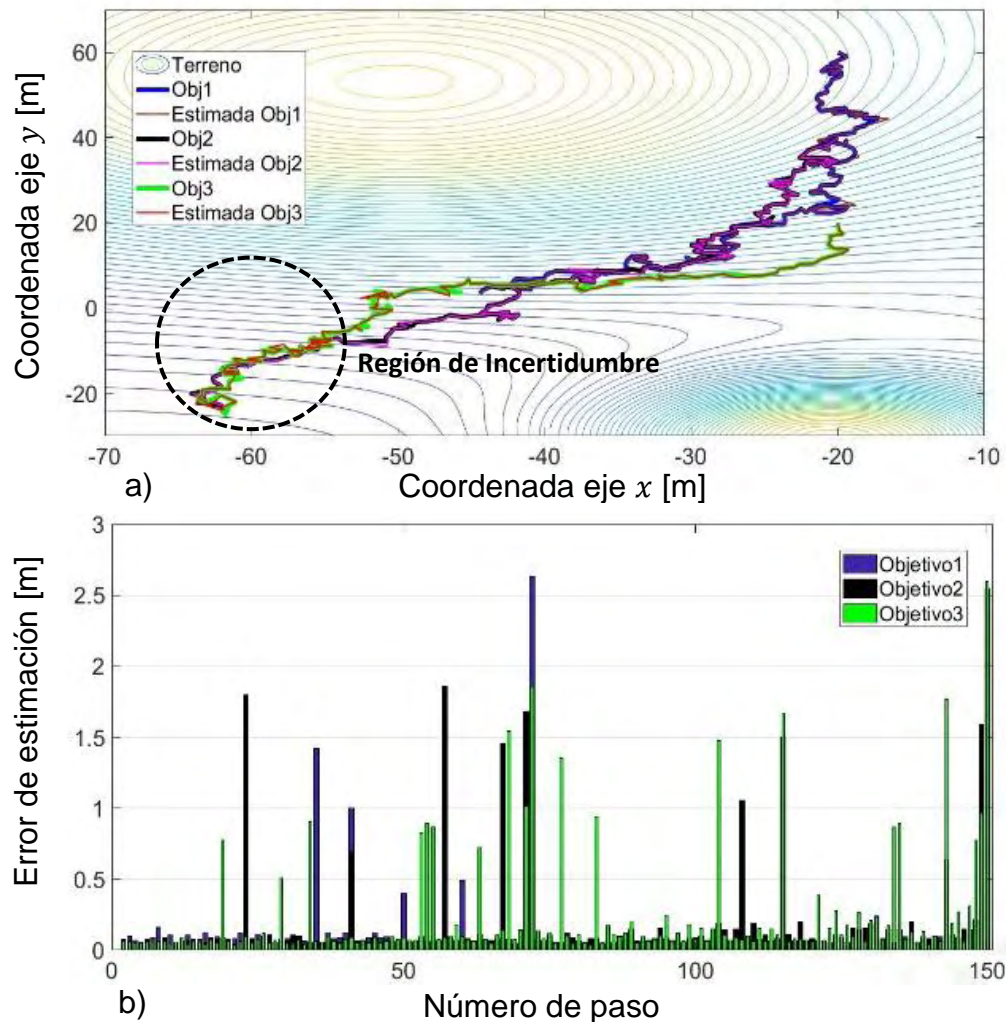


estimación.

Fuente: creación propia.

El experimento de simulación realizado para las trayectorias de la Figura 31, también es llevado a cabo con las mismas caminatas y la técnica de trilateración probabilística. Los resultados que se obtienen se presentan en la Figura 32, se puede observar en a) que a diferencia del caso anterior los trayectos para el objetivo 2 y 3 no se confunden sino hasta los últimos 3 pasos, como se ilustra en b).

Figura 32. Resultados cruces entre objetivos región de incertidumbre técnica de posicionamiento empleada trilateración probabilística: a) trayectorias b) errores de



estimación.

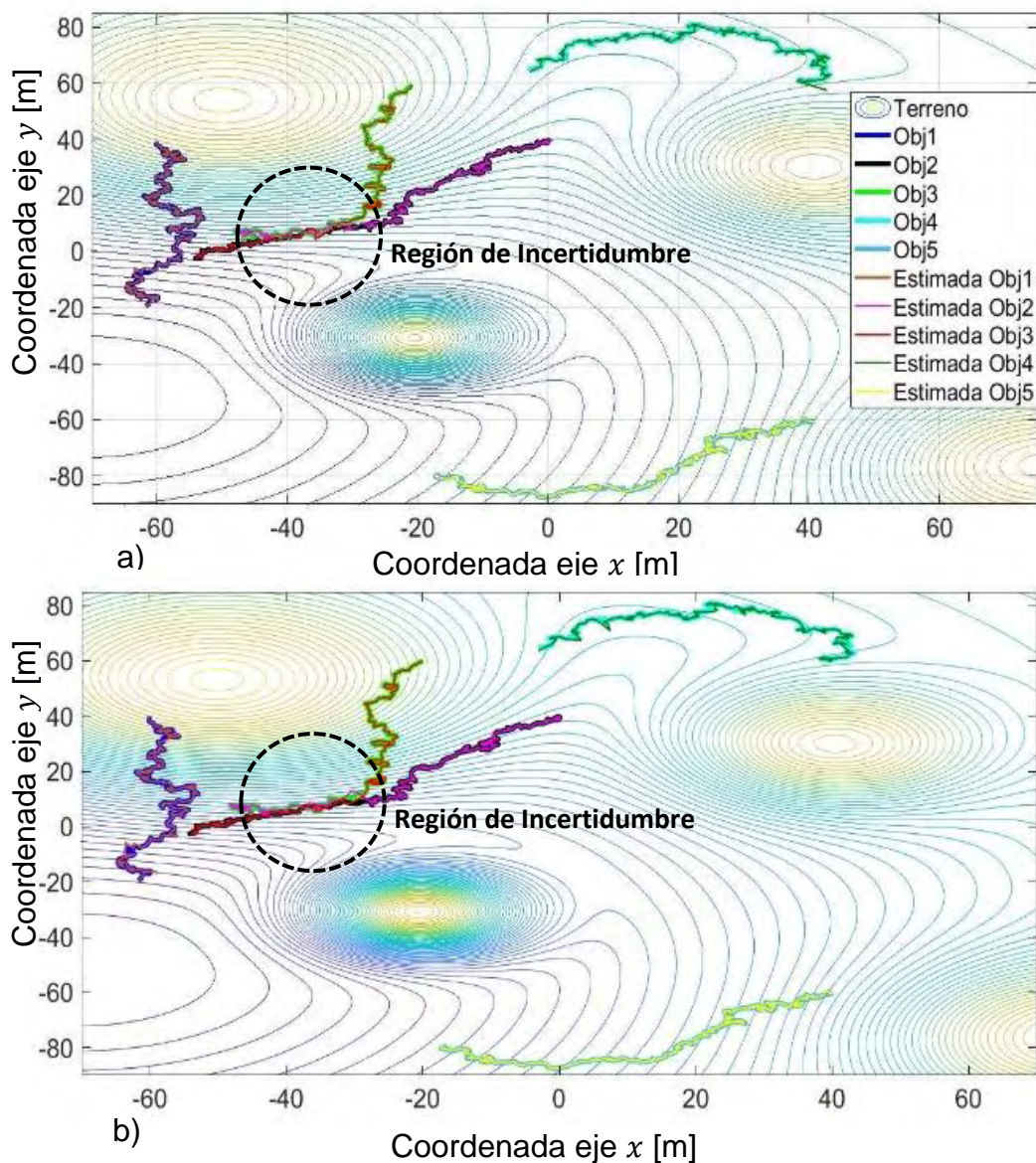
Fuente: creación propia.

La Figura 33, ilustra los resultados de aplicar la metodología propuesta a 5 individuos que desarrollan una caminata aleatoria BCRW de 150 pasos. En a) se

presentan los resultados de las trayectorias real y las asignadas por el sistema empleando como técnica de posicionamiento la trilateración convencional. Por otra parte, en b), se muestra el mismo escenario, pero se emplea la trilateración probabilística. Ambas figuras evidencian que la metodología propuesta permite construir las trayectorias de múltiples objetivos dispersos en un área de búsqueda.

Se puede notar que entre los objetivos 2 y 3 hay un cruce de trayectorias como los estudiados en la Figuras 31 y 32. Ambas caminatas empiezan su recorrido alejadas una de otra y en un determinado tiempo se aproximan de manera que la distancia entre ellas es menor que la resolución del sistema de radar en múltiples ocasiones. En este momento es cuando los trayectos son confundidos y dada la aleatoriedad de las camitas no se cuenta con la información necesaria para establecer que existe un cruce o para evitarlo.

Figura 33. Resultados 5 objetivos técnica de posicionamiento aplicada a)



trilateración convencional b) probabilística.

Fuente: creación propia.

Es posible que el sistema presentado logre vencer las situaciones de cruce, pero no siempre será así, en regiones donde los trayectos coincidan en tiempo y espacio será susceptible la confusión, como consecuencia en un escenario real, durante y después de las regiones de incertidumbre, no se puede identificar que trayecto corresponde a que objetivo.

Los resultados presentados permiten afirmar que la trilateración probabilística es más robusta en la estimación de coordenadas, porque tolera un error en las medidas de rango. Sin embargo, en un escenario multiobjetivo, esta técnica presenta mayores errores en la asignación de trayectorias individuales, esto responde a que en varios pasos no se detecta la totalidad de objetivos, y se asigna las coordenadas estimadas por el predictor Kalman a la trayectoria.

Situación opuesta se presenta con la trilateración convencional, esta técnica no es fuerte en estimar las coordenadas cuando los rangos exhiben un grado de error, y en escenarios multiobjetivo la técnica es propensa a estimar más de la totalidad de objetivos, estimando objetivos falsos. Sin embargo, en el trazado individual de trayectorias los errores de asignación son menores que la trilateración probabilística y los objetivos ficticios son despreciados por acción del algoritmo de asociación de datos.

## 6. CONCLUSIONES

Con el propósito de caracterizar el funcionamiento de un sistema de radar armónico convencional se ha presentado en esta investigación, un modelo matemático de la etiqueta armónica y la potencia en las diferentes etapas de propagación de una señal de interrogación para un radar pulsante. A partir del modelo matemático se simuló el sistema en el software MATLAB, para obtener los rangos a los cuales se ubican los diferentes objetivos de la estación de radar.

Dos técnicas de posicionamiento relativo, que emplean las medidas de los rangos: trilateración convencional y probabilística, han sido adaptadas al sistema de radar armónico para posicionar varios transpondedores estáticos. Las técnicas propuestas se probaron en dos escenarios para un espacio bidimensional, el primero de ellos requiere tres estaciones transceptoras y el segundo emplea dos estaciones receptoras y una transmisora. Los resultados obtenidos permiten concluir que al emplear tres estaciones transceptoras el proceso de posicionamiento es más preciso y la metodología propuesta para realizar la extensión a múltiples objetivos es menos compleja.

Posteriormente, se extendió la metodología para detectar múltiples objetivos que emulan el movimiento de insectos como caminatas aleatorias correlacionadas, se empleó para este fin el predictor Kalman y el algoritmo de asociación de datos Munkres, en conjunto con las técnicas de posicionamiento relativo adaptadas a múltiples objetivos. Los resultados muestran que la metodología propuesta permite construir la trayectoria individual de múltiples objetivos con errores de estimación pequeños, siempre y cuando el objetivo sea detectado por el radar en la mayoría de los pasos y los objetivos no coincidan en tiempo y espacios que difieran a la resolución del sistema. Esta última situación genera regiones que se han denominado en esta investigación como “regiones de incertidumbre”, que corresponden a las zonas en las cuales las trayectorias de dos o más objetivos no son identificables.

Finalmente, los resultados mostrados fueron realizados aplicando las dos técnicas de posicionamiento adaptadas. Se concluye que al emplear la trilateración convencional se arrojan menores errores de estimación, esto se debe a que generalmente posiciona la totalidad o más objetivos incluyendo ficticios, por el contrario, la trilateración probabilística es menos susceptible a estimar objetivos falsos y soporta un mayor rango de error en las medidas, por lo cual es más robusta en las regiones de incertidumbre, pero se corre el riesgo de no identificar objetivos verdaderos lo que incrementa el error en la asignación de la trayectoria.



## 7. RECOMENDACIONES

La investigación detallada en este documento fue totalmente teórica, los parámetros propuestos para emular las estaciones de radar fueron tomados de investigaciones anteriores [19], [20], [52], en las cuales se implementaron sistemas de radares armónicos aplicados al monitoreo de especies animales de tamaño pequeño. Como trabajo futuro queda indagar en la implementación y validación de la técnica propuesta en un entorno real. Para ello a continuación, se exponen algunas recomendaciones a tener en cuenta en una posible implementación de un sistema prototipo.

Una consideración para crear un prototipo de una estación de radar es la selección de la frecuencia de operación, para esto se debe tener en cuenta la asignación de frecuencias realizada en Colombia por La Agencia Nacional del Espectro ANE [53], encontrar frecuencias de operación que cumplan los estándares de la regulación existente será complicado. Por ejemplo, según la ANE la banda de 2.3 a 2.45 GHz es de uso no licenciado destinada a la investigación y a radio aficionados [54], sin embargo en un sistema de radar armónico la recepción se realiza al doble de la frecuencia, por lo tanto si se transmite a 2.4 GHz se requiere la recepción a 4.8 GHz la cual según la ANE [53] es de uso licenciado.

En el prototipo, para el desarrollo de las estaciones transceptoras se pueden emplear tarjetas de radio definido por software por ejemplo el uso de BladeRF 2.0 [55], módulos transceptores de radio que operan en banda ultra ancha UWB como el dispositivo P440 [56], la tarjeta de la corporación DecaWave DW1000 que es un transceptor de baja potencia en banda ultra ancha [57], entre otros. Seleccionado el dispositivo a emplear se deben conocer las restricciones en las frecuencias de operación, el ancho de banda y las características particulares que puedan ser útiles al momento de realizar el prototipo. Por otra parte, el uso de estos dispositivos reduce considerablemente el rango máximo de detección como consecuencia de la baja potencia de transmisión permitida, por lo que al emplearlos se debe indagar en el uso de amplificadores de potencia antes de realizar la transmisión o compensar la potencia radiada efectiva con una antena de transmisión que garantice un mayor alcance.

Otra forma de desarrollar un prototipo es emplear una estructura que combine diversos dispositivos como mezcladores, osciladores, amplificadores, entre otros. Algunos modelos fueron desarrollados en las investigaciones [6], [15], para sus

prototipos se contó con elementos de organizaciones como: *QuinStar*<sup>1</sup> experta en el desarrollo de sistemas para radares de onda milimétrica, *Millitech*<sup>2</sup> que distribuye antenas especializadas y *Tektronix*<sup>3</sup> que oferta una amplia gama de analizadores de espectro.

En la investigación desarrollada se propone una etiqueta armónica constituida por un dipolo de media onda, sin embargo, sí el diseño de la estación de radar se hace a frecuencias de operación más bajas, es fácil darse cuenta que las dimensiones del dipolo  $\lambda / 2$  crecen. Pensando en el monitoreo de insectos y en que la nueva etiqueta no presente inconvenientes debido a su tamaño, se puede construir un dipolo más corto acorde a la frecuencia de operación, por ejemplo para una frecuencia  $f_o = 2.4 \text{ GHz}$  se podría emplear un dipolo de  $\lambda/10$  para alcanzar una longitud de 12.5 mm, sin embargo se debe tener en cuenta que el valor de la sección transversal  $\sigma_n$  se modifica en términos de la nueva longitud de onda y ganancias del dipolo corto.

Otra consideración importante radica en la modulación de la señal a transmitir, como se planteó a lo largo del desarrollo de la presente investigación, en los radares pulsados se emplea un tren de pulsos con características especiales que envuelve un tono sinusoidal, no obstante en la práctica transmitir un pulso rectangular crearía interferencias y sería imposible de transmitir, por lo anterior generalmente se emplean pulsos particulares para obtener una eficiencia espectral más conveniente, algunos de ellos son el pulso gaussiano o el *Raised Cosine*, ambos representan formas más suaves de envolventes y su densidad espectral se concentra en un ancho de banda limitado.

---

<sup>1</sup> <https://quinstar.com/application-notes-millimeter-wave-radar-subsystems/>

<sup>2</sup> <http://www.millitech.com/>

<sup>3</sup> <https://www.tek.com/spectrum-analyzer>

## BIBLIOGRAFIA

- [1] W. Bouten, E. W. Baaij, J. Shamoun-Baranes, and K. Camphuysen, "A flexible GPS tracking system for studying bird behaviour at multiple scales," *Springer-Verlag*, pp. 571–580, 2013.
- [2] H. A. Baldwin, "Long-Range Radio Tracking of Sea Turtles and Polar Bear Instrumentation and Preliminary Results," *NASA, Washingt. Anim. Orientat. Navig.*, pp. 19–37, 1972.
- [3] J. R. Hagler and C. G. Jackson, "Methods for marking insects: current techniques and future prospects.," *Annu. Rev. Entomol.*, vol. 46, pp. 511–543, 2001.
- [4] J. Márquez Luna, "Técnicas de colecta y preservación de insectos," *Boletín Soc. Entomológica Aragon.*, vol. 37, pp. 385–408, 2005.
- [5] Z. M. Tsai *et al.*, "A high range resolution 9.4/18.8 GHz harmonic radar for bees searching," *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 4–6, 2012.
- [6] N. Tahir and G. Brooker, "The investigation of millimetre wave optical harmonic transponders and radar for monitoring small insects," *WiSNet 2013 - Proc. 2013 IEEE Top. Conf. Wirel. Sensors Sens. Networks - 2013 IEEE Radio Wirel. Week, RWW 2013*, pp. 22–24, 2013.
- [7] D. Psychoudakis, W. Moulder, C. C. Chen, H. Zhu, and J. L. Volakis, "A portable low-power harmonic radar system and conformal tag for insect tracking," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 7, pp. 444–447, 2008.
- [8] O. Ovaskainen *et al.*, "Tracking butterfly movements with harmonic radar reveals an effect of population age on movement distance," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 105, no. 49, pp. 19090–19095, 2008.
- [9] H. Y. Hsu *et al.*, "Harmonic radar using multiple receivers and angle of arrival positioning technique for environment with obstacles," *Eur. Microw. Week 2015 "Freedom Through Microwaves", EuMW 2015 - Conf. Proceedings; 2015 45th Eur. Microw. Conf. Proceedings, EuMC*, pp. 975–978, 2015.
- [10] G. Nates Parra, "Abejas silvestres y polinización," *Manejo Integr. plagas y Agroecol. (Costa Rica)*, no. 75, pp. 7–20, 2005.
- [11] H. Aumann, E. Kus, B. Cline, and N. W. Emanetoglu, "A low-cost harmonic radar for tracking very small tagged amphibians," *Conf. Rec. - IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf.*, no. 3, pp. 234–237, 2013.

- [12] J. Kiriazi, J. Nakakura, K. Hall, N. Hafher, and V. Lubecke, "Low profile harmonic radar transponder for tracking small endangered species," *Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. - Proc.*, no. V, pp. 2338–2341, 2007.
- [13] K. A. Gallagher, K. A. Gallagher, and T. J. Kane, "Harmonic Radar: Theory and Applications To Nonlinear Target Detection, Tracking, Imaging and Classification," The Pennsylvania State University, 2015.
- [14] B. Colpitts, D. Luke, G. Boiteau, and M. Doyle, "Harmonic radar identification tag for insect tracking," *Eng. Solut. Next Millenn. 1999 IEEE Can. Conf. Electr. Comput. Eng. (Cat. No.99TH8411)*, vol. 2, pp. 602–606, 1999.
- [15] H. M. Aumann and N. W. Emanetoglu, "A wideband harmonic radar for tracking small wood frogs," *IEEE Natl. Radar Conf. - Proc.*, no. 1, pp. 108–111, 2014.
- [16] J. M. Pérez, "Prueba de concepto de un radar pasivo multiestático para aplicaciones aeronáuticas," Universidad Politécnica de Valencia, 2015.
- [17] G. J. Mazzaro and K. D. Sherbondy, "Combined Linear and Nonlinear Radar : Waveform Generation and Capture," 2013.
- [18] B. G. Colpitts and G. Boiteau, "Harmonic radar transceiver design: Miniature tags for insect tracking," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 52, no. 11, pp. 2825–2832, 2004.
- [19] D. Milanesio, M. Sacconi, R. Maggiora, D. Laurino, and M. Porporato, "Design of an harmonic radar for the tracking of the Asian yellow-legged hornet," *Ecol. Evol.*, vol. 7, no. 13, pp. 4599–4606, 2017.
- [20] D. Dardari, "Detection and accurate localization of harmonic chipless tags," *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, 2015.
- [21] C. a. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, Third Edit. New Jersey, USA, 2012.
- [22] M. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, Second. Singapore: McGRAW-Hill book company, 2001.
- [23] A. M. Becerra, "Implementación de Codificación de Canal para Sistemas de Comunicaciones Digitales," Universidad de Chile, 2010.
- [24] J. C. Vélez, "False Alarm and Detection Probabilities Calculation of a Digital Unified Detector," *Dyna*, vol. 77, pp. 271–280, 2010.
- [25] D. A. De la Mata, "Diseño de Detectores Robustos en Aplicaciones de Radar," Universidad de Alcalá, 2012.
- [26] J. P. Pascual, "Procesamiento de Señales de Radar en Presencia de Clutter Dinámico," Universidad Nacional de La Plata, 2014.

- [27] R. López, “Estudio y Optimización de Filtros CFAR, Empleando Criterios de Energía con Aplicación a Radares de Navegación,” Universidad de Piura, 2013.
- [28] Bassem R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*, Third Edit. Alabama, USA, 2013.
- [29] SKYWORKS, “SMS7630-061: Surface Mount , 0201 Zero Bias Silicon Schottky Detector Diode,” 2015. .
- [30] Agilent Technologies, “Beam Lead Schottky Diodes for Mixer and Detectors (1-26 GHz),” 1999. .
- [31] P. V Nikitin, K. V. S. Rao, S. F. Lam, V. Pillai, R. Martinez, and H. Heinrich, “Power Reflection Coefficient Analysis for Complex Impedances in RFID Tag Design,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 9, pp. 2721–2725, 2005.
- [32] K. Rasilainen, J. Ilvonen, A. Lehtovuori, J. Hannula, V. Viikari, and S. Member, “On Design and Evaluation of Harmonic Transponders,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 1, pp. 15–23, 2015.
- [33] K. Rasilainen, J. Ilvonen, and V. Viikari, “Antenna Matching at Harmonic Frequencies to Complex Load Impedance,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 14, pp. 535–538, 2015.
- [34] H. Aumann, E. Kus, B. Cline, and N. W. Emanetoglu, “An Asymmetrical Dipole Tag with Optimum Harmonic Conversion Efficiency,” *Antennas Propag. Soc. Int. Symp. (APSURSI), 2012 IEEE*, pp. 75–76, 2012.
- [35] A. Pineda-brise and R. Menchaca-m, “An Experimental Study on the Effectiveness of Trilateration and Probabilistic Multilateration for Position Estimation in MANETs,” *Lat. Am. Comput. Conf. CLEI*, 2015.
- [36] A. Pineda, “Enrutamiento y Posicionamiento Integrado en Redes Móviles AD HOC,” Instituto Politécnico Nacional, 2013.
- [37] E. K. P. Chong and S. H. Zak, *An Introduction to optimization*, Second. United States of America: Wiley, 2001.
- [38] T. Fasciano, H. Nguyen, A. Dornhaus, and M. C. Shin, “Tracking Multiple Ants in a Colony,” *2013 IEEE Work. Appl. Comput. Vis.*, pp. 534–540, 2013.
- [39] R. M. Kareiva and N. Shigesada, “Analyzing Insect Movement as a Correlated Random Walk,” *Springer-Verlag Oecologia*, pp. 234–238, 1983.
- [40] E. A. Codling, M. J. Plank, and S. Benhamou, “Random walk models in biology,” *R. Soc.*, no. April, pp. 813–834, 2008.
- [41] H. Wu, B. Li, T. A. Springer, and W. H. Neill, “Modelling animal movement as

- a persistent random walk in two dimensions: expected magnitude of net displacement,” *Elsevier*, vol. 132, pp. 115–124, 2000.
- [42] A. Nicosia, T. Duchesne, L. Rivest, and D. Fortin, “A General Hidden State Random Walk Model for Animal Movement,” *Elsevier*, pp. 1–38, 2016.
- [43] V. Nams, “The VFracal: A new estimator for fractal dimension of animal movement paths,” *Landscapae Ecol.*, vol. 11, no. 5, pp. 289–297, 1996.
- [44] B. T. McClintock and T. Michelot, “momentuHMM: R package for generalized hidden Markov models of animal movement,” *Methods Ecol. Evol.*, vol. 9, no. 6, pp. 1518–1530, 2018.
- [45] L. Rivest, T. Duchesne, A. Nicosia, and D. Fortin, “A general angular regression model for the analysis movement in ecology,” *R. Stat. Soc. Appl. Stat.*, pp. 445–463, 2014.
- [46] D. B. Reid, “An Algorithm for Tracking Multiple Targets,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 24, no. 6, pp. 843–854, 1979.
- [47] R. W. Sittler, “An Optimal Data Association Problem in Surveillance Theory,” *IEEE Trans. Mil. Electron.*, vol. 8, no. 2, pp. 125–139, 1964.
- [48] Q. Chen, Y. Yan, and Y. Dai, “Joint Nearest Neighbor Data Association Based on Interacting Multiple Model Kalman Filtering,” *IEEE Int. Conf. Comput. Commun.*, no. 2, pp. 75–79, 2016.
- [49] A. B. Poore, N. Rijavec, A. B. Poore, and N. Rijavec, “Multitarget tracking and multidimensional assignment problems,” *Signal Data Process. Small Targets*, vol. 1481, no. August 1991, 1991.
- [50] P. Konstantinova, A. Udvariev, and T. Semerdjiev, “A Study of a Target Tracking Algorithm Using Global Nearest Neighbor Approach,” *CompSysTech '03 Proc. 4th Int. Conf. Conf. Comput. Syst. Technol. e-Learning*, pp. 290–295, 2003.
- [51] J. A. Molinet Berenguer, “Optimización Evolutiva Multiobjetivo basada en el Algoritmo de Kuhn-Munkres,” Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, 2014.
- [52] B. G. Colpitts, D. M. Luke, and G. Boiteau, “Harmonic radar for insect flight pattern tracking,” *2000 Can. Conf. Electr. Comput. Eng. Conf. Proceedings. Navig. to a New Era (Cat. No.00TH8492)*, vol. 1, pp. 302–306, 2000.
- [53] Agencia Nacional del Espectro Colombia, *Cuadro nacional de atribución de bandas de frecuencia*. 2016.
- [54] Ministerio de Tecnologías de la información y las comunicaciones, *Resolución 473 de 2010 ANE*. 2010.

- [55] Nuad®, “Hoja de datos: BladeRF 2.0 USB 3.0 Software Defined Radio.” pp. 1–4.
- [56] Time Domain®, “Hoja de datos y manual del usuario: PulsON 440.” pp. 1–64, 2015.
- [57] DecaWave®, “Manual del usuario: DW1000.” pp. 1–233, 2015.

## ANEXOS

**Anexo 1.** Artículo presentado en XVI LACCEI INTERNATIONAL MULTI-CONFERENCIA FOR ENGINEERING, EDUCATION AND TECHNOLOGY. ([http://www.laccei.org/LACCEI2018-Lima/student\\_Papers/SP545.pdf](http://www.laccei.org/LACCEI2018-Lima/student_Papers/SP545.pdf))

# Trilateración Adaptada para Posicionar Múltiples Objetivos en un Sistema de Radar Armónico

Manuela Chacón y Juan Ordoñez

Universidad de Nariño, Colombia, [mavivi95@gmail.com](mailto:mavivi95@gmail.com), [jgabrielordo95@gmail.com](mailto:jgabrielordo95@gmail.com).

**Resumen**— En el presente artículo se propone una técnica de posicionamiento relativo para ubicar múltiples objetivos dispersos en un área definida para un escenario de radar armónico. La propuesta está orientada al monitoreo de insectos o animales de tamaño pequeño y se fundamenta en la técnica de trilateración convencional. En esta versión se presenta un modelo matemático del radar armónico y los parámetros que permiten emular su comportamiento; posteriormente, se estudia la trilateración convencional y se plantea una metodología para extenderla a escenarios de múltiples objetivos y, finalmente, validando el sistema completo mediante simulaciones, se logra posicionar múltiples objetivos con un error menor a 30 cm en un área circular de 90 m de radio.

**Palabras clave**—Radar armónico, etiqueta armónica, trilateración, seguimiento de fauna.

### I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el seguimiento de fauna es una actividad común para fines de estudio e investigación, encaminándolo a múltiples propósitos como: la preservación de especies, el control de plagas, el fortalecimiento de la biodiversidad biológica y la conservación del equilibrio ecológico. Los métodos de seguimiento de fauna se han modernizado y el uso de la electrónica ha facilitado este proceso; por ejemplo, mediante la aplicación de métodos de comunicación y transmisión de datos, tales como emisores vía satélite, GPS y módulos de radio frecuencia; todos aptos para el rastreo de especies de tamaño considerable [1], [2].

A diferencia de este tipo de especies, para el seguimiento de animales de tamaño pequeño, como insectos, se ha utilizado tradicionalmente métodos de captura, marca y recaptura, a través de trampas de caída, trampas de luz, trampas con cebo y demás [3], [4], que resultan ser inconvenientes, entre otras razones, por la alteración del ambiente y del comportamiento natural de la especie. Para minimizar estos efectos, se han desarrollado sistemas electrónicos especializados para el seguimiento de estas especies, como el radar armónico, que es un sistema caracterizado por el empleo de transpondedores de tamaño reducido, peso ligero y funcionamiento en modo pasivo, pero que solo permite identificar un individuo a la vez debido al uso de una única frecuencia [5]–[8].

El propósito del presente estudio es adaptar teóricamente una técnica de posicionamiento relativo a un sistema de radar armónico, con el fin de encontrar la posición de múltiples objetivos dispersos en un área definida. En este trabajo se propone como punto de partida la trilateración en diferentes escenarios de radares, extendiéndola como solución al problema planteado de localización de múltiples objetivos. Los resultados obtenidos por medio de simulaciones permiten

posicionar múltiples objetivos con un error menor a 30 cm en un área circular de 90 m de radio.

El artículo se organiza en las siguientes secciones: En II se presenta un modelo matemático que permite emular el sistema de radar armónico; luego, en III se estudia la técnica de trilateración orientada a la ubicación relativa de un único objetivo; posteriormente, en IV se propone la extensión de la trilateración al estudio del posicionamiento de múltiples objetivos; finalmente, en V se presentan las conclusiones y las sugerencias para el trabajo futuro.

### II. ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE RADAR ARMÓNICO

El problema del seguimiento de insectos radica en el tamaño de estos; al ser virtualmente indistinguibles del entorno, si se aplican técnicas de radar convencional, la energía reflejada por la incidencia de las ondas electromagnéticas sobre el insecto es despreciable en comparación a la energía reflejada por el entorno, y esto conlleva a la invisibilidad del blanco u objetivo. Una posible solución es situar sobre el insecto una etiqueta armónica que contiene un dispositivo no lineal, el cual al ser iluminado por el haz del radar genera armónicos de la señal transmitida, constituyendo lo que se conoce en general como un sistema de radar armónico.

En la Fig. 1 se presenta la propuesta de arquitectura de radar armónico de onda pulsante, conformado por el transmisor, el receptor y la etiqueta armónica.

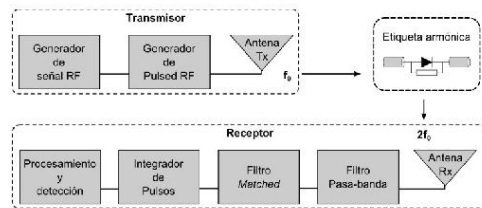


Fig. 1 Arquitectura de radar armónico

#### A. Transmisor

El transmisor se encarga de generar y transmitir un tono sinusoidal,  $v(t) = V_0 \cos(2\pi f_0 t + \theta)$ , modulado por un tren de pulsos,  $T_r(t + PRT) = u(t) - u(t - PW)$ . Donde  $V_0$  es la amplitud del tono,  $f_0$  es su frecuencia fundamental y  $\theta$  es una fase inicial;  $PRT$  es el periodo del tren de pulsos y  $PW$  es el ancho del pulso.  $u(t)$  es la función escalón unitario.

Los parámetros  $PRT$  y  $PW$  se relacionan con el alcance máximo no ambiguo y la resolución del sistema.

Digital Object Identifier: (to be inserted by LACCEI).  
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

16<sup>th</sup> LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Innovation in Education and Inclusion", 19-21 July 2018, Lima, Peru.

1



respectivamente. El primer concepto hace referencia a la distancia máxima sin ambigüedades a la cual se puede recibir un eco del pulso transmitido antes de transmitir el siguiente; por otro lado, la resolución se define como la distancia mínima que debe existir entre dos objetivos para lograr la detección de ambos. Para una estación transeptora (capaz de transmitir y recibir al mismo tiempo),  $PRT = 2R_u/c$  y  $PW = r_{es}/c$ . En este estudio, se toma un rango máximo no ambiguo  $R_u = 100$  m y una resolución  $r_{es} = 2$  m.  $c$  corresponde a la velocidad de la luz.

### B. Etiqueta armónica

La etiqueta armónica se modela mediante una antena tipo dipolo y un dispositivo no lineal. Generalmente se toma un dipolo de longitud  $\lambda/2$ , donde  $\lambda$  corresponde a la longitud de onda en la frecuencia fundamental [9], [10], y un diodo *Schottky* como dispositivo no lineal. Debido a que el diodo requiere un bajo potencial de operación, la potencia de la señal recibida por el dipolo es suficiente para activarlo.

La corriente característica del diodo, en términos del voltaje de excitación, se describe en (1). El parámetro  $I_s$  corresponde a la corriente de saturación y  $\alpha = q/n_eKT$ , donde  $q$  es la carga elemental,  $n_e$  es el coeficiente de emisión,  $K$  es la constante de Boltzmann y  $T$  es la temperatura absoluta de la unión.

$$i(t) = I_s(e^{\alpha v(t)} - 1) \quad (1)$$

Al expandir en series de potencias la corriente característica del diodo y excitarlo con el tono sinusoidal, se puede apreciar las componentes armónicas generadas por la etiqueta. En (2) se escriben las componentes hasta el segundo armónico, donde  $f_0$  corresponde a la frecuencia fundamental y  $f_H = 2f_0$  es la frecuencia en el segundo armónico.

$$i(t) = \frac{I_s \alpha^2}{4} V_0^2 + I_s \alpha V_0 \cos(2\pi f_0 t) + \frac{I_s \alpha^2}{4} V_0^2 \cos(2\pi f_H t) \quad (2)$$

Un parámetro sustancial en los sistemas de radares es la sección de radar equivalente *RCS* (*radar cross-section*), que mide cuan detectable es un objeto. Para el caso de una etiqueta armónica tipo dipolo, este parámetro es una constante que se obtiene con (3), donde  $\sigma_n$  es la *HRCS* (*harmonic radar cross-section*),  $E_d$  es la eficiencia de conversión del diodo,  $G_{tagn}$  corresponde a la ganancia del dipolo en la frecuencia armónica,  $A_{eff}$  es el área efectiva de la etiqueta en la frecuencia fundamental y  $n$  el número del armónico al cual se recibe la señal.

$$\sigma_n = E_d G_{tagn} A_{eff}^n \quad (3)$$

### C. Receptor

La recepción de la señal se realiza al doble de la frecuencia de transmisión. La potencia con la que llega la señal se calcula con (4), donde  $\lambda_n$  es la longitud de onda en la frecuencia armónica,  $P_T$  es la potencia de transmisión,  $G_T$  es la ganancia

de la antena transmisora,  $G_{Rn}$  es la ganancia de la antena receptora en la frecuencia armónica, y  $d_t$  y  $d_r$  son las distancias transmisor - objetivo y objetivo - receptor, respectivamente.

$$P_{rn} = \frac{\sigma_n G_{rn} \lambda_n^2 (P_T G_T)^n}{(4\pi)^{n+2} d_t^{2n} d_r^2} \quad (4)$$

Para realizar un modelamiento más completo del receptor, la señal que incide se acompaña de una fuente de ruido; en este trabajo, se considera la contaminación con ruido aditivo blanco gaussiano AWGN (*additive white Gaussian noise*). Además, para bloquear señales en frecuencias diferentes a  $f_H$  se emplea un filtro pasa-banda, y con el propósito de maximizar la relación señal ruido *SNR* (*signal-to-noise ratio*) y facilitar la detección de la señal, se propone un filtro adaptado como en [11], en el cual la señal de salida es la correlación de la señal contaminada con ruido y la de referencia, esta última debe ser la señal transmitida en el doble de la frecuencia fundamental.

Después del proceso de filtrado, y aprovechando que la etiqueta armónica refleja una cierta cantidad de pulsos cuando es iluminada por el haz de radar, se realiza una integración de los ecos recibidos que mejora la probabilidad de detección. Este proceso, dependiendo del sistema, se realiza de forma coherente o no coherente. Particularmente, en el presente estudio se integra un total de 15 pulsos de forma no coherente.

Para realizar la detección final, es necesario también establecer un umbral de detección. Este parámetro se fija con el criterio óptimo de *Neyman - Pearson*, el cual busca maximizar la probabilidad de detección bajo la restricción de que la probabilidad de falsa alarma no exceda un valor constante [12], [13].

### D. Simulación de la arquitectura

La simulación de la arquitectura de radar armónico se realiza en el software MATLAB® y a partir de los parámetros descritos en la Tabla I.

TABLA I  
PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Parámetro	Símbolo	Valor
Frecuencia fundamental	$f_0$	9.41 GHz
Frecuencia armónica	$f_H$	18.82 GHz
HRCS	$HRCS$	$2 \times 10^{-6}$ m
Numero de pulsos a integrar	$N_i$	15
Rango máximo	$R_u$	100 m
Resolución	$r_{es}$	4
Ganancia antena de transmisora	$G_T$	28.5 dBi
Ganancia antena receptora	$G_{Rn}$	27.4 dBi
Probabilidad de falsa alarma	$P_{FA}$	$10^{-2}$
Figura de ruido	$N_f$	4 dB
Temperatura de referencia	$T$	290 K

El experimento de simulación ubica dos objetivos a una distancia de 20 y 100 m de la estación transceptora. En la Fig. 2 se ilustran los resultados obtenidos del proceso de recepción de la arquitectura propuesta. La Fig. 2a muestra la potencia de la señal recibida y se observa que el eco reflejado por el objetivo que se ubica a 100 m, el rango máximo, no supera el umbral de detección y su potencia no se diferencia de algunos picos de ruido. Por otra parte, la potencia de la señal del objetivo ubicado a 20 m es mayor que el umbral de detección. En la Fig. 2b se muestra el efecto del filtro adaptado en la *SNR*, evidenciándose que existe una diferencia notoria entre los pulsos reflejados por los objetivos y el ruido del sistema. Finalmente, en la Fig. 2c se traza la señal después de llevar a cabo la integración de pulsos; como resultado se observa que el objetivo en el máximo rango no ambiguo supera el umbral de detección. Nótese como el umbral se ve afectado en los tres procesos indicados, esto se debe a que tanto el filtro como la integración de pulsos introducen una ganancia al umbral.

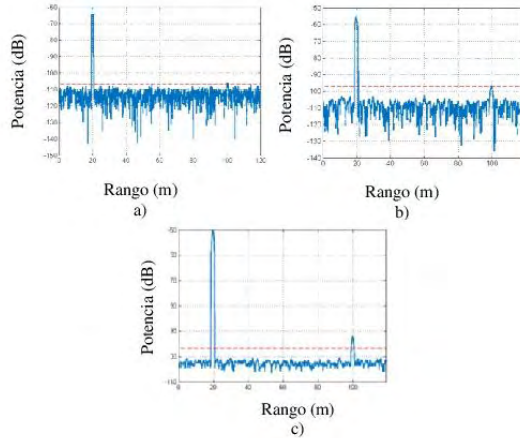


Fig. 2 Proceso de recepción. a) Señal recibida. b) Señal filtrada. c) Señal integrada.

En un sistema de radar armónico convencional, como el emulado, se obtiene el rango en el cual se encuentra ubicado el objetivo; no obstante, se hace necesario la proposición de una técnica que permita estimar las coordenadas relativas sobre las cuales se ubica el objetivo.

### III. POSICIONAMIENTO EMPLEANDO TRILATERACIÓN

La trilateración es una técnica de posicionamiento que emplea las medidas de las distancias, entre el objetivo y varias estaciones receptoras, para determinar las coordenadas relativas en las que se ubica el objetivo. En esta sección se describe la aplicación de la técnica mencionada al sistema de radar analizado en el apartado anterior [14], en un escenario de estudio en dos dimensiones y que consta de tres estaciones

transceptoras y un objetivo disperso en el área de búsqueda. Para este espacio se hace necesario un mínimo de tres estaciones receptoras no colineales.

Las coordenadas del objetivo  $(x^*, y^*)$ , deben satisfacer el conjunto de ecuaciones descritas en (5), donde  $(x_i, y_i)$  corresponden a las posiciones de las estaciones transceptoras y  $d_i$  son las distancias estimadas entre el objetivo y cada una de las estaciones  $(i = 1, 2, 3)$ .

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = d_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = d_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = d_3^2 \end{cases} \quad (5)$$

La ecuación (5) se puede expresar como un sistema lineal de la forma  $Ax = B$ , cuya solución, (6), corresponde a las coordenadas  $(x^*, y^*)$ .

$$2 \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \\ (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

#### A. Simulación de la trilateración

Para analizar los resultados de esta técnica se plantea un escenario con tres estaciones transceptoras ubicadas en las coordenadas  $(0,0)$ ,  $(-10,0)$  y  $(0,10)$ . Se generan 50 posiciones aleatorias para un objetivo localizado dentro del área de detección segura. Se considera que la detección del objetivo es probable mientras sea detectado por las tres estaciones transceptoras. Si cada una de estas estaciones tiene un rango máximo no ambiguo de 100 m, y se ubican en las coordenadas antes mencionadas, el área sobre la cual un objetivo podrá ser detectado por todas las estaciones corresponde a la intersección de tres circunferencias, de radio 100 m y centros equivalentes a las coordenadas de las estaciones. Para nuestro caso, corresponde a un área circular aproximada de 90 m de radio.

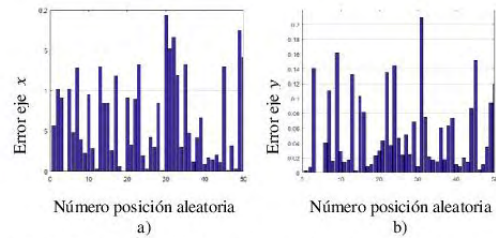


Fig. 3 Error de estimación de posiciones aleatorias para un objetivo.

El error entre las coordenadas estimadas y las diferentes posiciones aleatorias generadas, se presenta en la Fig. 3. Debido a que los rangos estimados por el radar no son precisos, las coordenadas encontradas por medio de trilateración no serán exactas y se calcularán con un error inferior a 20 cm en cada eje. Teniendo en cuenta los valores mostrados en las anteriores

gráficas, una cota de error máximo de la distancia entre la posición real y la estimada, de acuerdo con los máximos errores obtenidos en cada eje ( $\varepsilon_x$  y  $\varepsilon_y$ ), se puede definir como:

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2} \quad (7)$$

Y que resulta para los valores simulados, de  $\varepsilon \approx 28$  cm.

#### IV. EXTENSIÓN A MÚLTIPLES OBJETIVOS

##### A. Planteamiento del problema

Bajo condiciones ideales, considerando un escenario de radar armónico con varios objetivos  $N$  y una configuración de  $M$  estaciones receptoras, todas las estaciones reciben un vector correspondiente a las medidas de la distancia entre estas y el objetivo  $i$ , se tiene en la estación  $M$  y en general para cualquier estación un vector de la forma (8), donde  $d_{M1}$  corresponde a la distancia estimada entre la estación  $M$  y el objetivo más cercano, de manera que  $d_{MN}$  es la distancia entre la estación y el objetivo más lejano. Es fácil notar que  $d_{M1} < d_{M2}$  y, de manera general,  $d_{Mi} < d_{M(i+1)}$ .

$$d_M = [d_{M1} \quad d_{M2} \quad \dots \quad d_{Mi} \quad d_{M(i+1)} \quad \dots \quad d_{MN}] \quad (8)$$

Para cada estación se construyen vectores similares y como se puede observar, el orden de las componentes de cada vector no se relaciona con el mismo objetivo. Para llevar a cabo una técnica de posicionamiento en un espacio bidimensional, es necesario contar con mínimo tres distancias estimadas entre las estaciones y un objetivo. En consecuencia, el problema ahora se traslada a encontrar la combinación correcta de distancias que correspondan a un mismo objetivo con las diferentes estaciones. Luego de ser identificadas las distancias correctas, se puede aplicar una técnica de posicionamiento relativo y encontrar para cada  $i$ -ésimo objetivo sus coordenadas  $(x_i, y_i)$ .

Además de lo planteado, se debe considerar dos situaciones relevantes: En primer lugar, al existir más de un objetivo en el área se presentarán reflexiones no deseadas entre estos, y si se encuentran lo suficientemente cerca de la estación receptora, de manera que la potencia de la reflexión no deseada supere la potencia mínima de recepción, se recibirán ecos con información falsa. Este fenómeno se ilustra en la Fig. 4 y sucedería entre los Tag 1 y 2.

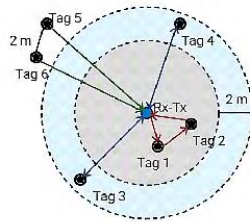


Fig. 4 Situaciones no deseadas en un escenario de radar armónico con múltiples objetivos

En segundo lugar, el concepto de resolución, previamente definido, afecta la identificación de objetivos que estén separados por distancias menores a la resolución del sistema; por ejemplo, en la Fig. 4 los ecos reflejados por los Tag 5 y 6 son detectados como uno solo. Así mismo, el problema de la resolución se extiende a objetivos dispersos pero ubicados en radios que no difieran más de la resolución del sistema, esta situación se ilustra en la Fig. 4 y sucedería con los Tag 3 y 4. En conclusión, todos los objetivos ubicados en la región azul serán asumidos como uno solo.

##### B. Solución propuesta

Debido a que no es posible identificar las distancias estimadas que representan el mismo objetivo para las diferentes estaciones, se propone construir un arreglo en el cual cada columna represente una posible combinación para un objetivo. Este arreglo contiene un total de  $M$  filas y  $N^M$  columnas, de las cuales solo  $N$  son correctas; por ejemplo, en un escenario con tres estaciones receptoras y dos objetivos, el arreglo asociado corresponde a la matriz que se muestra en (9).

$$C = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{11} & d_{11} & d_{11} & d_{21} & d_{21} & d_{21} & d_{21} \\ d_{21} & d_{21} & d_{22} & d_{22} & d_{21} & d_{21} & d_{22} & d_{22} \\ d_{31} & d_{32} & d_{31} & d_{32} & d_{31} & d_{32} & d_{31} & d_{32} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Una vez que se ha construido el arreglo de combinaciones, para extender la técnica de trilateración a múltiples objetivos, se debe encontrar la combinación correcta de distancias y posteriormente estimar la posición. La metodología propuesta consiste en obtener las coordenadas  $(x^*, y^*)$  para cada columna de la matriz  $C$  y por medio de la resolución del sistema de ecuaciones (6). Como criterio para seleccionar la combinación que corresponde a cada uno de los objetivos, las coordenadas estimadas deben satisfacer el sistema de ecuaciones (10), y para nuestro caso con un error menor a  $\varepsilon = 28$  cm, que corresponde a la diferencia entre la posición estimada y la real cuando el objetivo se ubica en el máximo rango no ambiguo; de este modo, se tiene en cuenta el error de estimación de rangos en el sistema de radar y el error en la técnica de posicionamiento.

$$\begin{cases} (x^* - x_1)^2 + (y^* - y_1)^2 - d_{11}^2 < \varepsilon \\ (x^* - x_2)^2 + (y^* - y_2)^2 - d_{21}^2 < \varepsilon \\ (x^* - x_3)^2 + (y^* - y_3)^2 - d_{31}^2 < \varepsilon \end{cases} \quad (10)$$

##### C. Análisis de la solución

Para analizar la viabilidad de la metodología propuesta, primero se ubican 7 objetivos dispersos en posiciones aleatorias dentro del área de detección segura; es decir, ninguna de las posiciones genera situaciones no deseadas. Los rangos estimados por las tres estaciones de radar generan una matriz de 343 combinaciones, de las cuales solo 7 permiten estimar las posiciones reales de los objetivos.

Los errores en la estimación de las posiciones para cada coordenada se presentan en la Fig. 5. Se evidencia que la totalidad de objetivos fueron posicionados con un error por

debajo de los 20 cm y que el método propuesto es capaz de desechar las 336 combinaciones restantes.

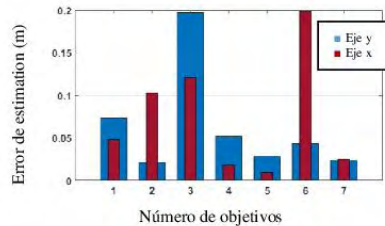


Fig. 5 Error de estimación para un escenario de 7 objetivos

Por otra parte, para evaluar el desempeño del método propuesto en situaciones no deseadas, se propone el escenario ilustrado en la Fig. 6. Las estaciones transceptoras mantienen las posiciones anteriores fijadas: (0,0), (-10,0) y (0,10), y cinco objetivos o *Tag* se disponen de tal forma que: los rotulados como 1, 2 y 3 reflejan un solo eco a la estación uno; del mismo modo, los rotulados como 1 y 3 lo hace a la estación tres y las reflexiones entre 4 y 5 generan un eco adicional en la estación dos. Los vectores de rangos estimados para las estaciones uno, dos y tres son respectivamente: [10.40 11.64 29.96], [2.96 5.96 8.93 19.96 33.48 39.96] y [10.72 12.16 31.6 41.96].

Con estos rangos se generan 72 posibles combinaciones para estimar las posiciones de los 5 objetivos, de las cuales 12 son generadas por el rango adicional estimado en la estación 2. El criterio de decisión (10) permite ubicar sin inconvenientes los objetivos 1, 3, 4 y 5; sin embargo, las coordenadas estimadas para el objetivo 2 generan un error  $\epsilon$  superior al establecido, debido a que el rango visto por la estación uno tiene un error de 2.14 m. En la Fig. 6, los objetivos que fueron posicionados por el método se resaltan de color azul.

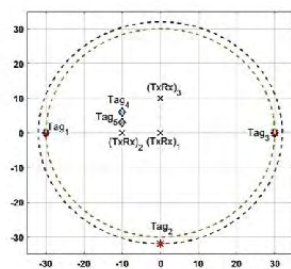


Fig. 6 Escenario de 5 objetivos en situaciones no deseadas

### V. CONCLUSIONES

Los sistemas de radar armónico son una herramienta eficiente para el monitoreo de especies de tamaño pequeño,

debido a que presentan ventajas sustanciales frente a los métodos manuales; pero aún existen problemas que limitan su uso y campos de aplicación.

Se desarrolló teóricamente una técnica de posicionamiento para un sistema de radar armónico en un ambiente ideal. Los resultados obtenidos muestran que la metodología propuesta permite posicionar, en la mayoría de los casos, múltiples objetivos en un área determinada (zona segura).

En un ambiente real, los rangos estimados por el radar presentan errores; por consiguiente, como trabajo futuro se pretende robustecer la técnica propuesta y extenderla a objetivos móviles. Otro aspecto para tener en cuenta a futuro es la mejora del costo computacional de la metodología propuesta, ya que el arreglo de combinaciones crece potencialmente con el número de objetivos.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al ingeniero Wilson Achicanoy Martínez asesor de la investigación realizada, a la Universidad de Nariño, al Departamento de Electrónica y al Grupo de Investigación en Ingeniería Eléctrica y Electrónica – GIEE, por su apoyo académico y financiero para la consecución de los objetivos propuestos en esta investigación.

### REFERENCIAS

- [1] W. Bouten, E. W. Baaij, J. Shamoun-Baranes, and K. Camphuysen, "A flexible GPS tracking system for studying bird behaviour at multiple scales," *Springer-Verlag*, pp. 571–580, 2013.
- [2] H. A. Baldwin, "Long-Range Radio Tracking of Sea Turtles and Polar Bear Instrumentation and Preliminary Results," *NASA, Washingt. Anim. Orientat. Navig.*, pp. 19–37, 1972.
- [3] J. R. Hagler and C. G. Jackson, "Methods for marking insects: current techniques and future prospects," *Annu. Rev. Entomol.*, vol. 46, pp. 511–543, 2001.
- [4] J. Márquez Luna, "Técnicas de colecta y preservación de insectos," *Boletín Soc. Entomológica Aragon.*, vol. 37, pp. 385–408, 2005.
- [5] Z. M. Tsai et al., "A high range resolution 9A/18.8 GHz harmonic radar for bees searching," *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 4–6, 2012.
- [6] N. Tahir and G. Brooker, "The investigation of millimetre wave optical harmonic transponders and radar for monitoring small insects," *WiSNet 2013 - Proc. 2013 IEEE Top. Conf. Wirel. Sensors Sens. Networks - 2013 IEEE Radio Wirel. Week, RWW 2013*, pp. 22–24, 2013.
- [7] D. Psychoudakis, W. Moulder, C. C. Chen, H. Zhu, and J. L. Volakis, "A portable low-power harmonic radar system and conformal tag for insect tracking," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 7, pp. 444–447, 2008.
- [8] Z. Tsai, F. Chang, K. Lin, E. Yang, F. Lian, and H. Wang, "Application of Harmonic Radar on the Research of Bees' Behavior," pp. 5–8, 2016.
- [9] B. Colpitts, D. Luke, G. Boiteau, and M. Doyle, "Harmonic radar identification tag for insect tracking," *Eng. Solut. Next Milenn. 1999 IEEE Can. Conf. Electr. Comput. Eng. (Cat. No. 99TH8411)*, vol. 2, pp. 602–606, 1999.
- [10] D. Milanese, M. Saccani, R. Maggiora, D. Laurino, and M. Porporato, "Design of an harmonic radar for the tracking of the Asian yellow-legged homet," *Ecol. Evol.*, vol. 7, no. 13, pp. 4599–4606, 2017.
- [11] J. M. Pérez, "Prueba de concepto de un radar pasivo multiestático para aplicaciones aeronáuticas," *Universidad Politécnica de Valencia*, 2015.
- [12] J. P. Pascual, "Procesamiento de Señales de Radar en Presencia de Clutter Dinámico," *Universidad Nacional de La Plata*, 2014.
- [13] D. Dardari, "Detection and accurate localization of harmonic chipless tags," *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2015, no. 1, p. 13, 2015.
- [14] A. Pineda, "Enrutamiento y Posicionamiento Integrado en Redes Móviles AD HOC," *Instituto Politécnico Nacional*, 2013.

Anexo 2. Certificado de asistencia LACCEI.



Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions

**XVI LACCEI INTERNATIONAL MULTI-CONFERENCE  
FOR ENGINEERING, EDUCATION AND TECHNOLOGY**

**The OAS Summit of Engineering for the Americas**  
Lima Peru July 18 – 20, 2018

The LACCEI 2018 Technical Committee certifies the presentation in the **STUDENT POSTER COMPETITION:**

**TRILATERACIÓN ADAPTADA PARA POSICIONAR MÚLTIPLES OBJETIVOS EN UN  
SISTEMA DE RADAR ARMÓNICO**

**MANUELA CHACÓN (CO)**  
**JUAN ORDOÑEZ (CO)**  
**WILSON ACHICANOY (CO)**



Lima, Peru  
July 18 – 20, 2018



Adriana Páez Pino, PhD.  
LACCEI President



María M. Larrondo Petrie, PhD.  
LACCEI Executive Director

*"Innovation, Education, and Inclusion"*

SP #545