



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

UNIDAD ZACATENCO

PROGRAMA DE SISTEMAS AUTÓNOMOS DE NAVEGACIÓN AÉREA Y SUBMARINA

**“Localización de vehículos aéreos no tripulados para la
navegación en zonas sub-urbanas utilizando tecnología de
banda ultra ancha”**

TESIS

Que presenta

Luis Angel Arellano Cruz

Para obtener el grado de

DOCTOR EN CIENCIAS

EN SISTEMAS AUTÓNOMOS DE NAVEGACIÓN AÉREA Y SUBMARINA

Directores de Tesis:

Dra. Giselle Monserrat Galván Tejada

Dr. Rogelio Lozano Leal

México, Ciudad de México

Abril, 2023.

Agradecimientos

A mis padres

Luis Antonio y Victoria por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida, además de motivarme a alcanzar mi metas a pesar de todas las dificultades.

A mi hermana

Ana Karen por permanecer a mi lado en todo momento.

A mis directores de tesis

Dra. Giselle Monserrat Galván Tejada y Dr. Rogelio Lozano Leal, sin ustedes este trabajo no hubiese sido posible. Gracias por su dedicación y paciencia, sobre todo por estar siempre al pendiente durante mi formación tanto profesional como personal. Donde quiera que vaya, siempre llevaré conmigo su guía y sus consejos.

A la Unidad Mixta Internacional UMI

A los profesores por orientarme y compartir conmigo sus valiosos conocimientos, y a mis compañeros con quienes compartí tardes de trabajo y estudio.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)

Por otorgarme una beca para la realización de mis estudios de doctorado.

A mis amigos

Por todas esas charlas y palabras de aliento que recibí de ustedes durante mis momentos más difíciles

Resumen

El uso de los vehículos aéreos no tripulados (UAVs por sus siglas en inglés) se ha popularizado enormemente actualmente debido a sus múltiples usos tanto en ambientes de exteriores (búsqueda y rescate, fotografía área, etc.) y de interiores (inspecciones internas, comprobación de inventario, etc.). Por otro lado, para que los UAVs puedan realizar sus tareas de forma autónoma es necesario conocer de forma precisa su posición en el espacio. Ahora bien, aunque existen diversos dispositivos para conocer la altura de vuelo tales como barómetro, sensores ultrasónicos ó sensores Lidar, la determinación de la posición en el plano XY resulta ser un problema más complejo.

En el caso de vuelos en exteriores generalmente se hace uso del GPS para determinar la posición del UAV mientras que para los casos de vuelos en interiores pueden usarse algoritmos de visión o métodos de radiofrecuencia. Por otro lado, para el caso de zonas en exteriores donde la señal de GPS resulta ineficaz por la presencia de obstáculos como edificios, casas o árboles como es el caso de zonas urbanas o boscosas, el problema de localización aún es un tema de interés ya que se requiere de un alto nivel de precisión para evitar colisiones en el ambiente durante una navegación autónoma.

Así, el objetivo de este trabajo de tesis es el proponer una estrategia para utilizar un sistema de localización con tecnología de banda ultra ancha (UWB por sus siglas en inglés) para la navegación de UAVs a bajas alturas en ambientes de exteriores y con múltiples obstáculos, aprovechando la precisión que ofrecen este tipo de sistemas, pero a su vez contrarrestando sus principales desventajas.

Para comprender el funcionamiento de los sistemas de localización por UWB se estudian los principios de operación de estos, incluyendo la propagación de la señal de radiofrecuencia y los principales métodos de posicionamiento. Además, se evalúa la eficacia de estos sistemas al ser utilizados dentro de ambientes sub-urbanos y boscosos con diferentes grados de densidad de objetos, determinando por medio de simulaciones que sus principales desventajas son el corto alcance y los altos costos de operación ya que se requeriría un gran número de módulos de UWB para poder garantizar la estimación de posición en ambientes con alto nivel de densidad de obstáculos.

Una vez estudiado con detenimiento el uso de sistemas de localización por UWB, se propone un nuevo algoritmo de posicionamiento basado en dos de los métodos ya existentes en la literatura pero que al combinarse permiten obtener una buena precisión para sistemas sin redundancia, es decir, con la mínima cantidad de información requerida para la estimación de posición. Más aún, el uso de este algoritmo permite mejorar la precisión de la estimación minimizando los costos de operación lo cual es verificado por medio de pruebas experimentales y

comparado directamente con un sistema de localización comercial.

Por último, se propone una estrategia de navegación con múltiples UAVs aplicando el algoritmo de posicionamiento propuesto en este trabajo de tesis para aumentar la eficiencia proporcionada por los sistemas de localización por UWB. El desempeño de esta estrategia es evaluado por medio de simulaciones demostrando que es posible reducir el número de anclas necesario para la navegación autónoma de UAVs y aumentando el alcance de estos sistemas de localización.

Abstract

The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) has become popular nowadays due to its multiple uses both in outdoor environments (search and rescue, aerial photography, etc.) and indoors (internal inspections, inventory check, etc.). On the other hand, in order for UAVs to perform their tasks autonomously, it is necessary to know with precision their position. Now, although there are various devices to obtain the flight height such as a barometer, ultrasonic sensors or Lidar sensors, the determination of the position in the XY plane turns out to be a more complex problem.

In the case of outdoor flights, GPS is generally used to determine the position of the UAV, but for indoor flights, vision algorithms or radio frequency methods can be used. On the other hand, in the case of outdoor areas where the GPS signal is ineffective due to the presence of obstacles such as buildings, houses or trees, as in the case of urban or wooded areas, the location problem is still a topic of interest due to a high level of precision is required to avoid collisions during autonomous navigation.

Thus, the objective of this thesis is to propose a strategy to use a location system with ultra-wideband (UWB) technology for UAV navigation at low altitudes in outdoor environments with multiple obstacles, taking advantage of the precision offered by this type of system, but at the same time counteracting their disadvantages.

In order to understand the operation of UWB location systems, its operating principles are studied, including the signal propagation and the main positioning methods. In addition, the effectiveness of these systems into suburban and wooded environments with different degrees of objects density is evaluated, determining through simulations that their main disadvantages are the short range and the high operating costs since it is necessary a large number of UWB modules in order to guarantee position estimation into environments with a high level of obstacles density.

After carefully studying the use of location systems by UWB, a new positioning algorithm is proposed based on two of the existing methods in the literature but when they are combined, made it possible to obtain a good precision for systems with no redundancy, in other words, with the minimum amount of information required for position estimation. Furthermore, the use of this algorithm increase the precision of the estimation by minimizing the operating costs, which is verified through experimental tests and directly compared with a commercial location system.

Finally, a navigation strategy with multiple UAVs is proposed by applying the positioning algorithm presented in this thesis in order to increase the efficiency provided by UWB localization systems. The performance of this strategy is evaluated through simulations demonstrating

that it is possible to minimize the number of anchors necessary for autonomous navigation of UAVs and maximizing the range of these location systems.

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	V
Abstract	VII
Índice de tablas	XIII
Índice de figuras	XV
Lista de acrónimos	XIX
Introducción	XXI
1. Sistemas de localización por radiofrecuencia	1
1.1. Sistemas de localización en tiempo real	1
1.1.1. Antecedentes históricos	1
1.1.2. Métodos de localización por radiofrecuencia	3
1.1.2.1. Basado en la potencia de la señal recibida [1]	3
1.1.2.2. Basado en el tiempo de arribo	3
1.1.2.3. Basado en diferencia de tiempo de arribo	4
1.1.2.4. Basado en el ángulo de arribo [2]	4
1.1.2.5. Métodos híbridos	5
1.2. Propagación de la señal de radiofrecuencia	5
1.2.1. Modelo de propagación de la señal	5
1.2.1.1. Modelo de propagación de espacio libre	6
1.2.1.2. Modelo de propagación por dos rayos	7
1.3. Sistemas de banda ultra ancha	9
1.3.1. Inicios y generalidades	9
1.3.2. Densidad espectral de potencia	10
1.3.3. Tren de pulsos	11
1.3.4. Capacidad espacial y espectral	11
1.3.5. Velocidad de transmisión de datos	12
1.4. Tiempo de arribo (ToA) de la señal	13

2. Métodos de posicionamiento	15
2.1. Conceptos preliminares	15
2.1.1. <i>Trilateración</i>	15
2.1.2. <i>Angulación</i>	17
2.1.3. Sistemas sobre-determinados	18
2.2. Métodos de localización	19
2.2.1. Gauss-Newton	19
2.2.2. Quasi-Newton	20
2.2.3. Máxima Verosimilitud	21
2.2.4. Ejes Radicales	22
2.3. Comparación entre los métodos de posicionamiento	24
3. Estimación de posición dentro de ambientes suburbanos	26
3.1. Efectos de objetos en la recepción de señales transmitidas en ambientes suburbanos	26
3.1.1. Fenómeno de ensombrecimientos	27
3.1.2. Fenómeno de trayectorias múltiples	27
3.2. Modelo de propagación	28
3.3. Niveles de macro-diversidad para posicionamiento de UAVs	30
3.3.1. Simulación de macro-diversidad en ambientes semi-boscosos	30
3.3.1.1. Ambiente de simulación	30
3.3.1.2. Resultados de simulación	33
4. Vuelo en formación de UAVs	37
4.1. Teoría de grafos y consenso en sistemas multiagentes	37
4.2. Vuelo en formación	40
4.3. Estructura virtual	41
5. Estrategias propuestas y análisis por simulación	44
5.1. Algoritmo RA-GN	44
5.2. Estrategia de navegación	49
5.3. Simulación de propuesta de navegación	51
5.4. Resultados	58
6. Pruebas experimentales del algoritmo RA-GN	63
6.1. Mediciones de distancia en exteriores	63
6.2. Pruebas experimentales del algoritmo RA-GN	64
6.2.1. Resultados para tres anclas	69
6.2.2. Análisis para cuatro anclas	75
7. Conclusiones	81
7.1. Tecnología de UWB para localización	81
7.2. Macro-diversidad	81
7.3. Métodos de posicionamiento	82
7.4. Vuelo en formación	82
7.5. Contribuciones originales	82
7.5.1. Algoritmo RA-GN	82

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	XI
7.5.2. Estrategia de navegación	83
7.6. Trabajo futuro	83
A. Bandas de frecuencia	84
B. Mecanismos de propagación	86
C. Preparación y configuración del DRTLS	88
C.1. Configuración de las anclas y el nodo etiqueta	88
C.2. Ejemplos de diferentes configuraciones del DRTLS	89
D. Artículos publicados de esta tesis	90
Referencias	91

Índice de tablas

1.1. Especificaciones técnicas de los módulos de transmisión XBee comúnmente utilizados para vehículos autónomos	7
1.2. Densidad espectral de potencia de los sistemas de comunicación inalámbrica más comunes	10
1.3. Comparación de capacidad espacial y espectral de varios sistemas inalámbricos en interiores [3].	12
1.4. Comparación de velocidad de transmisión entre la tecnología UWB y otras tecnologías de transmisión [3].	13
3.1. Especificaciones del módulo de UWB DWM1001	30
3.2. Niveles de macro-diversidad basados en el número de anclas.	32
3.3. Parámetros para caracterizar el fenómeno de trayectorias múltiples en comunicaciones de UWB.	32
5.1. Parámetros utilizados en la simulación para los controles PD.	56
6.1. Distancias medidas con condiciones de ausencia de línea de vista.	64
6.2. Posición y diametro de cada árbol dentro del escenario de pruebas.	66
6.3. Posiciones y condiciones de propagación respecto a cada ancla.	67
6.4. RMSE obtenido en la posición (0, -3.7) usando tres anclas.	70
6.5. RMSE obtenido en la posición (-4.6, 2.05) usando tres anclas.	71
6.6. RMSE obtenido en la posición (7,0) usando tres anclas.	72
6.7. RMSE obtenido en la posición (3,-2.5) usando tres anclas.	73
6.8. RMSE obtenido en la posición (-3.35,-4) usando tres anclas.	74
6.9. RMSE obtenido en la posición (-4,-7) usando tres anclas.	75
6.10. RMSE obtenido en la posición (0, -3.7) usando cuatro anclas.	76
6.11. RMSE obtenido en la posición (-4.6, 2.05) usando cuatro anclas.	77
6.12. RMSE obtenido en la posición (7,0) usando cuatro anclas.	77
6.13. RMSE obtenido en la posición (3,-2.5) usando cuatro anclas.	77
6.14. RMSE obtenido en la posición (-3.35,-4) usando cuatro anclas.	78
6.15. RMSE obtenido en la posición (-4,-7) usando cuatro anclas.	78
6.16. Valores de $\Delta\mu$ obtenidos en cada posición.	80
A.1. Designación de bandas de frecuencias	84

Índice de figuras

1.1.	Geometría para el método de trilateración para la estimación de la distancia . . .	4
1.2.	Geometría que representa el método de TDoA para la estimación de la posición de una terminal	5
1.3.	Gráfica comparativa de los niveles de potencia respecto a la distancia según el modelo de espacio libre para dos módulos de transmisión XBee: a) $f = 900$ MHz, $P_T = 250$ mW y b) $f = 2.4$ GHz, $P_T = 63$ mW	7
1.4.	Geometría del modelo de propagación de tierra plana.	8
1.5.	Tren de pulsos de un sistema UWB	11
1.6.	Técnica OWR para la medición de distancia a partir del ToA	14
1.7.	Técnica TWR para la medición de distancia a partir del ToA	14
2.1.	Ejemplo de trilateración	16
2.2.	Simplificación de trilateración en 3D.	17
2.3.	Ejemplo de trilateración	18
2.4.	Eje radical de dos circunferencias: a) cuando las circunferencias se tocan en dos puntos, b) cuando se tocan en un solo punto y c) cuando ambas circunferencias no se tocan	22
2.5.	Ejemplo de estimación de posición usando tres ejes radicales.	24
2.6.	CDF del RMSE obtenido por cada método de posicionamiento.	25
3.1.	Función de densidad de probabilidad Rice.	28
3.2.	Variación de la señal recibida en función de la distancia para diferentes fenómenos de propagación.	29
3.3.	Trayectoria del UAV en la simulación	31
3.4.	Distribución sin macro-diversidad ($N = 16$).	31
3.5.	Potencia recibida para ambientes de arbustos ligeros y bosque denso.	33
3.6.	CDF para diferentes niveles de macro-diversidad en ambientes de arbustos ligeros.	34
3.7.	CDF para diferentes niveles de macro-diversidad en ambientes de bosque ligero.	35
3.8.	CDF para diferentes niveles de macro-diversidad en ambientes de bosque medio.	35
3.9.	CDF para diferentes niveles de macro-diversidad en ambientes de bosque denso.	36
4.1.	Diferentes tipos de grafos: a) direccionado, b) no direccionado, c) estrella no direccionada, d) estrella direccionada, e) completo, f) árbol direccionado, g) ciclo no direccionado, h) ciclo direccionado	38

4.2. Ejemplo del consenso realizado por cinco agentes.	40
4.3. Representación gráfica del algoritmo para desplazarse en formación usando una estructura virtual.	42
4.4. Desplazamiento de tres robots móviles siguiendo la formación dada por la estructura virtual.	43
4.5. Desplazamiento de tres robots móviles cuando uno de ellos sufre una avería según el movimiento de la estructura virtual.	43
5.1. Área de simulación donde las anclas y el UAV son desplegados.	47
5.2. CDF del RMSE obtenido para los métodos comparados utilizando únicamente 3 anclas.	48
5.3. CDF del RMSE obtenido al evaluar el algoritmo RA-GN con distinto número de anclas.	48
5.4. CDF del RMSE obtenido para los métodos comparados utilizando un sistema con redundancia de 8 anclas.	49
5.5. Propuesta de navegación de UAVs dentro de un escenario desconocido.	50
5.6. UAV liberando anclas mientras vuela.	50
5.7. UAV liberando anclas mientras vuela.	50
5.8. Etapas de la simulación.	51
5.9. Diagrama de bloques para determinar la conexión entre anclas y UAVs.	52
5.10. Variables utilizadas en la etapa de “Conexión Anclas-UAVs”.	52
5.11. Diagrama de bloques para la estimación de posición de los UAVs.	53
5.12. Variables utilizadas en la etapa de “Estimación de posición”.	53
5.13. Diagrama de bloques para la generación de trayectorias usando la estructura virtual.	54
5.14. Variables utilizadas en la etapa de “Vuelo en formación”.	54
5.15. Variables usadas en la etapa de “Modelo del UAV”.	55
5.16. Diagrama a bloques del controlador aplicado al modelo dinámico de un multi-rotor.	57
5.17. Diagrama a bloques del sistema de propulsión para un modelo completo.	58
5.18. Área de simulación.	58
5.19. Anclas desplegadas durante la simulación.	59
5.20. Número de anclas respecto al tiempo de vuelo.	59
5.21. Errores en la estimación de posición de los UAVs.	60
5.22. Distancias entre UAVs durante la navegación.	61
5.23. Trayectorias realizadas por los UAVs en la simulación.	61
5.24. Desplazamientos realizados por los UAVs en cada uno de los ejes XYZ durante la simulación.	62
5.25. Cambios en la orientación realizados por los UAVs durante la simulación.	62
6.1. Dos diferentes escenarios con condiciones de línea de vista entre ellos: a) escenario libre de obstáculos, b) escenario semi-boscoso con árboles alrededor.	64

6.2. Cuatro diferentes escenarios con condiciones de ausencia de línea de vista entre ellos: 1) un árbol grande con un tronco de 35 cm de diámetro, 2) un árbol pequeño con un tronco de 10 cm de diámetro, 3) dos árboles grandes con troncos de 25 y 30 cm de diámetro, 4) un árbol grande y uno pequeño con troncos de 35 y 10 cm de diámetro.	65
6.3. Cuatro anclas y un nodo etiqueta dentro de un escenario semi boscoso.	66
6.4. Distribución de los elementos considerados en las pruebas experimentales.	67
6.5. Módulo DWM1001 en posición vertical ilustrando el ángulo de referencia (θ) considerado como posición angular.	68
6.6. Representación grafica del desempeño obtenido entre el algoritmo RA-GN y el DRTLS para el caso de 3 anclas.	79
6.7. Representación grafica del desempeño obtenido entre el algoritmo RA-GN y el DRTLS para el caso de 4 anclas.	79
B.1. Representación del fenómeno de atenuación y absorción [4]	87

Lista de acrónimos

AoA: Angle of Arrival
BS: Base Stations
CAD: Computer-Aided Design
CDF: Cumulative Distribution Function
DRTLs: Decawave Real-Time Location System
EHF: Extra High Frequency
GPS: Global Positioning System
HF: High Frequency
LOS: Line of Sight
LORAN: Long Range Navigation
LF: Low Frequency
MLE: Maximum Likelihood Estimator
MF: Medium Frequency
NLOS: No Line of Sight
OWR: One Way Ranging
PPM: Pulse Position Modulation
RA-GN: Radical Axis-Gauss Newton
RADAR: Radio Detection and Ranging
RF: Radio Frequency
RTLS: Real Time Localization System
RSS: Received Signal Strength
RMSE: Root Mean Square Error
SHF: Super High Frequency
TDoA: Time Difference of Arrival
ToA: Time of Arrival
TWR: Two Way Ranging
UHF: Ultra High Frequency
UWB: Ultra Wide Band
UAV: Unmanned Aerial Vehicle
VHF: Very High Frequency
VLf: Very Low Frequency

Introducción

Motivación

Hoy en día, el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAVs por sus siglas en inglés) tiene un amplio margen de aplicaciones principalmente cuando se habla de sistemas multi-agentes. Dichas aplicaciones van desde el transporte de objetos, búsqueda y rescate o fotografía área entre otros.

Por otro lado, el problema de localización de UAVs toma gran relevancia para el cumplimiento de tareas de forma autónoma debido a que se requiere conocer la posición del vehículo con precisión para evitar colisiones durante el cumplimiento de su tarea a realizar.

Planteamiento del problema

Uno de los principales aspectos a considerar dentro de la navegación autónoma de UAV's, es la obtención de la posición del vehículo principalmente cuando se realizan vuelos en formación ya que cada UAV debe tener la capacidad de medir y regular su distancia con los demás UAVs.

Diversos métodos de localización para ambientes en interiores y controlados han sido desarrollados con el fin de dar solución a esta problemática, algunos de estos métodos hacen uso de algoritmos de visión, radares, sensores ultrasónicos o técnicas de localización por radiofrecuencia. Sin embargo, el vuelo en formación dentro de zonas urbanas, suburbanas o áreas boscosas donde la señal de GPS se encuentra atenuada o nula actualmente sigue siendo un reto.

Justificación

Por lo general, el GPS es la mejor opción para la obtención de la posición durante la navegación de UAVs en exteriores, principalmente para vuelos a grandes alturas evitando los obstáculos que podrían interferir con la señal satelital. Por otro lado, si se desea navegar en ambientes de interiores existen diversas técnicas para lograrlo, aunque la mayoría de dichas técnicas requieren de cierto conocimiento del ambiente en el que se desea navegar así

como la instalación de estaciones base conocidas como *anclas* para el caso de los sistemas de localización por radiofrecuencia o la instalación de cámaras para el caso de algoritmos de visión.

Sin embargo, dentro el área de investigación de vehículos autónomos uno de los temas de mayor interés es el de la navegación y exploración de zonas desconocidas en las cuales comúnmente no es posible lograr una conexión de GPS confiable, por tal motivo, actualmente se requiere un sistema de localización que permita la navegación autónoma dentro de zonas desconocidas utilizando los beneficios de las técnica de localización en interiores.

Objetivo general

- Desarrollar un método de localización para la navegación de UAVs sin GPS dentro de zonas suburbanas aprovechando las ventajas de la tecnología UWB y las estrategias de localización para interiores.

Objetivos particulares

- Examinar los sistemas de localización por radiofrecuencia que existen actualmente para la navegación de UAVs en zonas donde la señal del GPS es atenuada por los obstáculos presentes tales como, edificios árboles, casas, etc.

- Desarrollar un nuevo método de localización capaz de estimar la posición con la mínima cantidad de información requerida y evaluar por medio de pruebas experimentales.

- Proponer y evaluar por simulación una estrategia para la navegación de múltiples UAVs dentro de zonas no exploradas utilizando un sistema de localización por radiofrecuencia y sistemas sin redundancia.

Sistemas de localización por radiofrecuencia

1.1. Sistemas de localización en tiempo real

Resulta de gran importancia comenzar este trabajo de tesis con aspectos asociados a los sistemas de localización en tiempo real (RTLS por sus siglas en inglés) los cuales se definen como una combinación de tecnologías de posicionamiento que permiten la localización geográfica de unidades móviles o fijas.

1.1.1. Antecedentes históricos

Desde los comienzos de la humanidad ha existido la necesidad de localizar objetos y lugares de interés para el hombre, y es por esto que nace la cartografía, siendo la ciencia encargada del estudio y elaboración de mapas [5].

Entre los primeros avances realizados cabe destacar los estudios de Galileo y Copérnico en su teoría heliocéntrica con la cual buscaban conocer la posición de la Tierra, el Sol y demás cuerpos celestes en el Universo siempre en movimiento además de definir por primera vez a la Tierra como una esfera [6]. Por otro lado, el descubrimiento de América por la expedición encabezada por Cristobal Colón en 1492 tuvo como consecuencia una producción masiva de mapas referentes al territorio recién descubierto.

Para el siglo XX las innovaciones tecnológicas tuvieron una gran influencia en el desarrollo de mapas. Además, en el ámbito militar comienza a darse una fuerte necesidad de conocer la posición del enemigo.

Fue durante la Segunda Guerra Mundial que Robert Watson-Watt apoyándose en la teoría electromagnética desarrollada por James Clerk Maxwell y demostrada por Henrich Rudolf Hertz, patentó el uso del RADAR (acrónimo de “*radio detection and ranging*”) el cual utilizaba ondas electromagnéticas para medir distancias, altitudes, dirección y velocidades de objetos como aviones o barcos [7].

El uso de estos radares contribuyó en gran medida a ganar la guerra ya que permitió al ejército británico localizar las fuerzas enemigas representando una notable ventaja estratégica, motivo por el cual a Robert Watson-Watt se le concedió el título de caballero.

También durante la Segunda Guerra Mundial Estados Unidos presentó el sistema llamado LORAN por *LOng RAnge Navigation* [8], desarrollado por el MIT's Radiation Laboratory utilizando los principios de *Time Difference of Arrival* (TDoA) a una frecuencia de 1.95 MHz. Con un alcance de 1200 km y una precisión de 160 m, fue el primer sistema de localización utilizado para ayudar a los barcos a encontrar su posición en el océano Atlántico sin importar las condiciones del clima, a pesar de las grandes tormentas del invierno.

Después de la guerra la guardia costera en Estados Unidos decidió seguir utilizando una variación de este sistema llamado LORAN-A operando a diferentes frecuencias. Con el fin de ser utilizado para la localización de aviones tácticos en la guerra de Vietnam se desarrolló el LORAN-C operando con una frecuencia de 100 kHz el cual al usar los conceptos de procesamiento de señales *multiple pulsing* y *phase coding* fue posible obtener una precisión de 460 m con un alcance de 3000 km [9].

Fue hasta el 4 de octubre de 1957, cuando la Unión Soviética puso en órbita el primer satélite artificial llamado Sputnik I dando comienzo a diversos desarrollos como los sistemas de localización satelital. El primer sistema de localización vía satélite llamado TRANSIT fue creado por la marina de los Estados Unidos para la navegación de sus barcos y submarinos, además de utilizarlo para orientar el lanzamiento de misiles. El principio usado en este sistema es el efecto Doppler, ya que se considera que los satélites se encuentran en continuo movimiento, existe un corrimiento de frecuencia en la señal recibida en el satélite conforme éste se desplaza. Sin embargo, en este primer sistema existía la desventaja de que era necesario que el satélite viajara al rededor de 10 a 15 minutos para recolectar la información suficiente para determinar una sola posición [10].

A partir del sistema TRANSIT, con el tiempo y gracias a los grandes avances científicos y de mejoras en la electrónica permitieron el nacimiento de sistemas de localización satelital mucho más confiables como el GPS (Estados Unidos), GLONASS (Rusia), GALILEO (Unión Europea), BEIDOU (China) [10].

En la actualidad los sistemas de localización satelital son generalmente utilizados en exteriores debido a que es necesaria una línea de visión directa (LOS, acrónimo de Line of Sight). Ahora bien, paralelamente se han desarrollado sistemas de localización no satelitales basados en radiofrecuencia, comúnmente empleados para sistemas de localización en ambientes de interiores o *indoor* (anglicismo utilizado para referirse al interior de edificios). Cabe destacar que no solamente tienen uso dentro del interior de edificios si no que también son usados en todo aquel ambiente donde la señal satelital se ve atenuada debido a los múltiples obstáculos existentes ya sea por la naturaleza (como árboles y montañas) o hechos por el hombre (edificios, casas, árboles, etc.) [5].

1.1.2. Métodos de localización por radiofrecuencia

Una vez que se ha revisado brevemente la historia de los primeros sistemas de localización, es momento de abordar los diferentes métodos utilizados actualmente para la localización de un objeto en particular utilizando señales de radiofrecuencia en ambientes considerados como interiores (para propósitos del presente trabajo de tesis estos ambientes no solo se consideran aquellos que se encuentran dentro de edificios, si no también toda aquella zona donde la señal del satélite se ve alterada por diversos obstáculos).

El estudio de algoritmos y métodos de localización para interiores ha tomado gran relevancia en los últimos años, esto debido a las aplicaciones que tienen tanto en la industria civil como militar. Algunas de estas aplicaciones pueden ser los espacios de trabajo inteligentes donde se facilita la navegación de robots o el seguimiento de personal dentro de centros de trabajo como almacenes, edificios, hoteles u hospitales. También pueden ser utilizados en el rescate de personas dentro de incendios o cualquier otra catástrofe minimizando el riesgo al que se enfrentan los rescatistas.

A continuación se presentan los métodos más utilizados en sistemas de localización por radiofrecuencia.

1.1.2.1. Basado en la potencia de la señal recibida [1]

El método de localización por potencia de señal recibida (RSS, *Received Signal Strength*) se basa en la pérdida de potencia que sufre la señal durante su propagación. Existen dos formas distintas de obtener la localización de una terminal (la cual puede ser móvil) utilizando la RSS, por el método de trilateración o por el método huellas dactilares.

Por un lado, al conocer el modelo de propagación de la señal se puede determinar la distancia posible d_i entre las estaciones base BS_i (*Base Station*) y la terminal a localizar. Para esto, es necesario utilizar al menos tres estaciones bases y conociendo sus respectivas distancias hacia la terminal a localizar, se logra estimar la posición a partir del método de trilateración (véase Figura 1.1). En la Sección 1.2 se hablará del modelo de propagación de la señal y cómo se relaciona con la distancia d_i .

Por otro lado, en el método de huellas dactilares o mejor conocido por su nombre en inglés *fingerprinting*, se miden los valores de RSS en puntos específicos dentro del área de interés creando así una base de datos como referencia donde idealmente los valores obtenidos resultan diferentes para cada punto medido. Por lo tanto, la posición de la terminal puede estimarse al comparar las mediciones reales con la base de datos de referencia [11].

1.1.2.2. Basado en el tiempo de arribo

El método basado en el tiempo de arribo (ToA, *Time of Arrival*) utiliza el tiempo que le toma a la señal viajar desde la terminal a la estación base y viceversa para estimar la distancia entre ambas. Para este método es necesario sincronizar tanto la terminal como cada una de las estaciones con el fin de conocer el tiempo exacto de propagación de la señal. Al igual que el

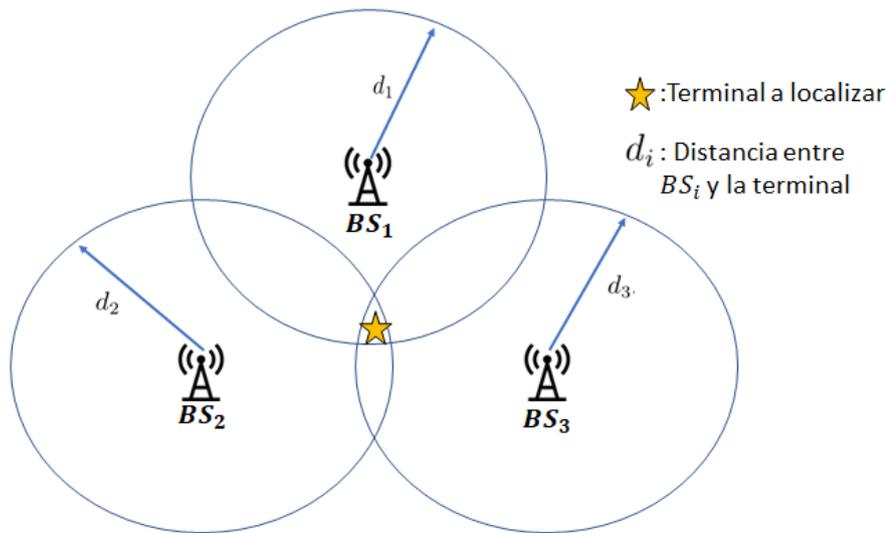


Figura 1.1: Geometría para el método de trilateración para la estimación de la distancia

método basado en potencia de señal recibida se necesitan al menos tres estaciones base para estimar la localización de la terminal dentro del plano 2D y cuatro para el espacio 3D. Sin embargo, con una correcta sincronización en los tiempos de la terminal a localizar y las BS, se puede obtener una mejor estimación de distancia comparado con el método por RSS.

1.1.2.3. Basado en diferencia de tiempo de arribo

El método basado en la diferencia de tiempo de arribo (TDoA, *Time Difference of Arrival*) examina la diferencia en los tiempos de llegada de la señal procedente de la terminal en cuestión a dos distintas estaciones base. De esta manera en lugar de considerar cada distancia como el radio de una circunferencia por cada medición TDoA se genera una ecuación hiperbólica como se muestra en la Figura 1.2.

La principal ventaja de este método respecto al método basado en ToA es que solo se necesita sincronizar las estaciones base, independientemente de la terminal.

1.1.2.4. Basado en el ángulo de arribo [2]

El método basado en el ángulo de arribo AoA (*Angle of Arrival*) se basa en calcular el ángulo con el que la señal llega al receptor desde el transmisor. Este método puede ser dividido en dos clases; la primera se basa en la respuesta de amplitud de la antena receptora y la segunda se basa en la respuesta de fase de la antena receptora.

En este método basta con dos mediciones para estimar la posición, sin embargo, pequeños errores en la medición del ángulo representan grandes errores en la estimación de posición, por tal motivo, no suele utilizarse a menos que esté acompañado de otros métodos.

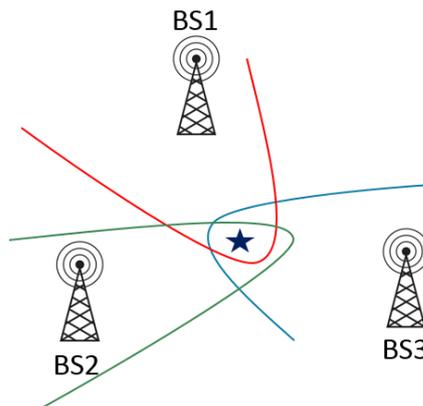


Figura 1.2: Geometría que representa el método de TDoA para la estimación de la posición de una terminal

1.1.2.5. Métodos híbridos

La idea principal de los métodos híbridos es la utilización de dos o más métodos previamente descritos con la finalidad de mejorar la precisión para estimar la posición de la terminal objetivo.

Se han realizado múltiples combinaciones de distintos métodos demostrando que se tienen mejores estimaciones que utilizando un solo método. Por ejemplo en [12] se utiliza un método híbrido combinando ToA, ToDA y RSS con el fin de demostrar que la estimación realizada es más precisa que al utilizar cada uno de los métodos por separado.

1.2. Propagación de la señal de radiofrecuencia

Debido a que el presente trabajo está relacionado directamente con la transmisión de señales, es necesario comprender la manera en que una transmisión se propaga por un medio desde una terminal transmisora a una receptora. En el Apéndice A se explica cada una de las bandas de frecuencia de acuerdo a su clasificación dentro del espectro radioeléctrico [13].

1.2.1. Modelo de propagación de la señal

En cuanto a los modelos de propagación, en este trabajo de tesis se toman en cuenta aquellos usados para sistemas celulares terrestres dadas las frecuencias donde pueden operar los UAVs y porque bien se pueden aplicar en las condiciones que se están considerando aquí. Por lo anterior, a continuación se expondrán algunos conceptos surgidos de estas aplicaciones.

Para comunicaciones móviles se considera que la transmisión es llevada a cabo principalmente en zonas urbanas, por tal motivo se requiere que las onda de radio sean capaces de propagarse dentro de edificios lidiando con fenómenos como la reflexión y la difracción, aun cuando la potencia de la señal pueda verse reducida sustancialmente, es necesario que los receptores sean capaces de detectar la señal en este tipo de ambientes, por tal motivo la

frecuencia de operación debe elegirse considerando las menores pérdidas de señal posible al operar bajo estas condiciones. Por tal motivo suelen utilizarse las bandas de frecuencia VHF y UHF. En el Apéndice B se resumen los principios físicos de los mecanismos de propagación de las señales viajando en estas bandas de frecuencia.

A continuación se explicarán los principales modelos de propagación de la señal encontrados en la literatura. En dichos modelos se busca mostrar el comportamiento de la señal en el canal, donde canal hace referencia al ambiente de propagación que va desde la antena transmisora hasta la receptora.

1.2.1.1. Modelo de propagación de espacio libre

En esta sección se presenta el modelo de propagación básico y usado como referencia, en el cual se muestra la relación entre la potencia de transmisión y la potencia de recepción. El modelo considerado como más simple es aquel donde se considera que la señal transmitida se encuentra en *espacio libre*, es decir, se encuentra libre de reflexiones dadas por la tierra o cualquier objeto, de igual manera se desprecian los fenómenos de difracción y absorción. En este caso se tiene que la densidad de potencia (potencia por unidad de área) a una distancia d de la fuente emisora está dada por [13]

$$W = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} \quad (1.1)$$

donde P_T es la potencia con la que se transmite la señal desde la antena transmisora y G_T la ganancia de dicha antena. Por lo tanto, la potencia recibida por la antena receptora la cual tiene un área efectiva A será

$$P_R = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} A = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} \quad (1.2)$$

Siendo G_R la ganancia de la antena receptora y λ la longitud de onda. De la Ecuación (1.2) se tiene que la relación entre potencia de transmisión P_T y la potencia de recepción P_R es

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left[\frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2 \quad (1.3)$$

Conociendo la relación entre longitud de onda λ , la frecuencia de operación f y la constante de la velocidad de la luz, ($c = f\lambda$), se puede reescribir la Ecuación (1.3) de la siguiente manera

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left[\frac{c}{4\pi f d} \right]^2 \quad (1.4)$$

En la Figura 1.3 se muestran dos gráficas las cuales representan los niveles de potencia recibida para el modelo de propagación en espacio libre considerando dos módulos de transmisión XBee los cuales suelen utilizarse para el desarrollo de sistemas de comunicación en vehículos autónomos, esto por su capacidad de comunicación punto a punto ó de punto a multipunto. En la Tabla 1.1 se muestran las especificaciones de los radios comparados, uno de

Modelo	Frecuencia de operación	Potencia de transmisión	Ganancia de la antena
XBP24-AWI-001J	2.4 GHz	63 mW	-10 dB
XBP9B-DMWT-002	900 MHz	250 mW	-10 dB

Tabla 1.1: Especificaciones técnicas de los módulos de transmisión XBee comúnmente utilizados para vehículos autónomos

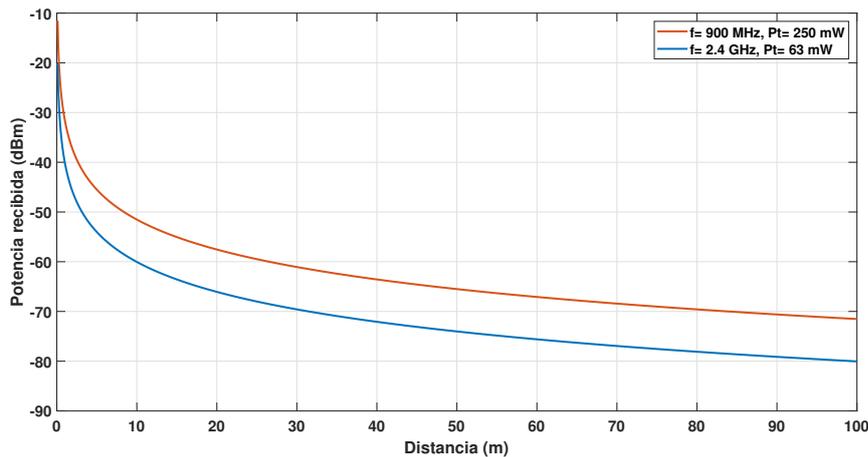


Figura 1.3: Gráfica comparativa de los niveles de potencia respecto a la distancia según el modelo de espacio libre para dos módulos de transmisión XBee: a) $f = 900$ MHz, $P_T = 250$ mW y b) $f = 2.4$ GHz, $P_T = 63$ mW

ellos opera a una frecuencia de 900 MHz y otro a 2.4 GHz [14].

En la Figura 1.3 se puede observar cómo se atenúa la señal conforme se aumenta la distancia en condiciones básicas de espacio libre. Así, queda de manifiesto tanto de esta figura como de la Ecuación (1.4) que la frecuencia de operación y la potencia de transmisión son factores importantes. En esta comparativa en particular se puede apreciar que el módulo de transmisión de 900 MHz tiene una menor atenuación, lo que significa que tendrá un mayor alcance comparado con el módulo de transmisión XBee de 2.4 GHz. Este comportamiento se puede atribuir tanto a la potencia de transmisión la cual es mayor y a su vez una menor frecuencia de operación.

1.2.1.2. Modelo de propagación por dos rayos

Como se dijo anteriormente el modelo de propagación para espacio libre aplica solo para condiciones muy especiales, sin embargo, en la mayoría de las situaciones prácticas siempre existen objetos o superficies sobre las cuales la señal se refleja. Dependiendo de las distancias entre terminales transmisoras y receptoras se pueden distinguir dos casos, si la distancia es lo suficientemente larga (miles de km) se debe tener en cuenta la curvatura de la tierra, por otro lado, si la distancia es relativamente corta se considera como una geometría de tierra plana. Lo anterior también se establece en comparación con la altura de las antenas de dichas terminales.

Considerando que en el presente trabajo se trabajará con sistemas de comunicación de

banda ultra ancha debido a que sus características son bastantes favorables en la aplicación de localización y que una de sus características es su corto alcance (aproximadamente 30 m), se tiene que una geometría de tierra plana corresponde bien.

Como su nombre lo indica el modelo de propagación por dos rayos se caracteriza porque al receptor llegan dos señales provenientes del transmisor, lo cual se muestra claramente en la Figura 1.4, una que viaja por una trayectoria directa r_d y otra que es reflejada r_r por el suelo el cual es considerado como una superficie plana.

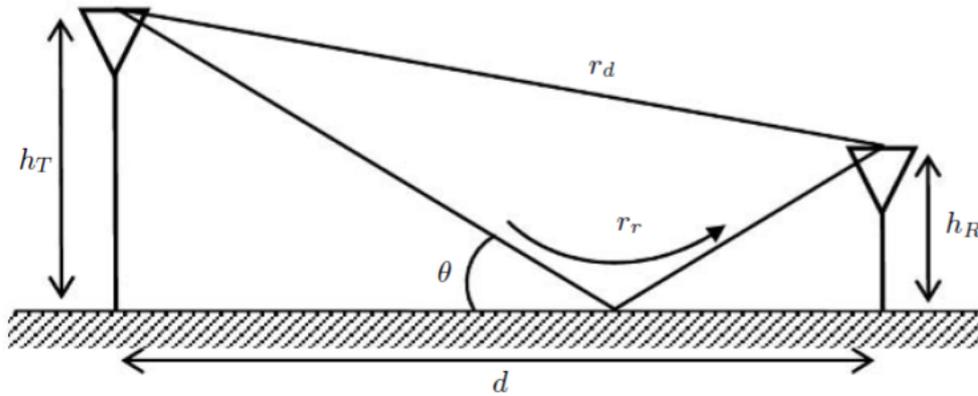


Figura 1.4: Geometría del modelo de propagación de tierra plana.

Dado que en el receptor existe una superposición de ambas señales, entonces, la señal recibida se verá afectada ya sea constructiva o destructivamente dependiendo de las fases de cada una de las señales que llegan por las dos trayectorias. La recepción conjunta de ambas señales se puede caracterizar equivalentemente a través de sus pérdidas dadas por la expresión

$$L_p = (G_p)^{-1} \quad (1.5)$$

donde G_p está definida como

$$G_p = \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{e^{-jkr_d}}{r_d} + \frac{R_{H,V} e^{-jkr_r}}{r_r} \right|^2 \quad (1.6)$$

donde $k = 2\pi / \lambda$ y las distancias de las trayectorias directa r_d y la reflejada r_r están dadas de la siguiente manera, respectivamente

$$r_d = \sqrt{d^2 + (h_T - h_R)^2} = d \sqrt{1 + \left(\frac{h_T - h_R}{d} \right)^2} \quad (1.7)$$

$$r_r = \sqrt{d^2 + (h_T + h_R)^2} = d \sqrt{1 + \left(\frac{h_T + h_R}{d} \right)^2} \quad (1.8)$$

Además en la Ecuación (1.6) $R_{H,V}$ se refiere al coeficiente de reflexión de Fresnel para la polarización horizontal o vertical, definido respectivamente, como [13]

$$R_H = \frac{\epsilon_r \sin \theta - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta}}{\sin \theta + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta}} \quad (1.9)$$

$$R_H = \frac{\epsilon_r \sin \theta - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta}}{\sin \theta + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta}} \quad (1.10)$$

donde ϵ_r es la constante dielectrica de la superficie reflectante.

Cabe mencionar que el modelo de propagación de tierra plana descrito en la literatura [15] el cual es usado comúnmente para sistemas de comunicación de banda angosta con la consideración de que la distancia entre las antenas es mucho mayor a sus alturas, no puede ser aplicable para los sistemas de banda ultra ancha los cuales funcionan a corto alcance y por tal motivo la hipótesis donde la distancia entre transmisor y receptor es mucho más grande que las alturas de las antenas $d \ll h_T, h_R$ no se aplican en esta situación como lo han señalado Bacco et al. [16].

1.3. Sistemas de banda ultra ancha

1.3.1. Inicios y generalidades

La tecnología de banda ultra ancha (UWB por sus siglas en inglés) inicia con los sistemas de radar los cuales fueron desarrollados para el ámbito militar con el fin de identificar objetivos a través de árboles o superficies bajo tierra [3]. Durante los años 60s y 90s del siglo pasado la tecnología UWB solo era utilizada por a milicia, pero actualmente, debido a las características de baja potencia, bajo costo, altas tasas de transmisión, precisión en el posicionamiento y la baja interferencia, resulta cada vez más común la aplicación de esta tecnología en sistemas electrónicos de consumo principalmente de comunicación y localización.

Los sistemas de UWB se diferencian de las tecnologías de transmisión inalámbrica convencionales de banda angosta por dos principales razones. A diferencia de las tecnologías de banda angosta donde la señal es transmitida en una sola frecuencia portadora en un ancho de banda angosto, la tecnología de UWB utiliza un amplio intervalo de frecuencias. En particular para ser considerado un sistema de UWB se debe tener un ancho de banda de al menos 500 MHz. Otra característica de la tecnología UWB es que contrario a utilizar ondas sinusoidales como la mayoría de las tecnologías de banda angosta, la tecnología UWB utiliza pulsos con duración extremadamente corta, desde unos pocos picosegundos hasta un nanosegundo, pero con la capacidad de transmitir cientos de millones de pulsos por segundo.

Una manera de resumir los beneficios del UWB es a través de la ecuación de capacidad de Shannon, la cual está dada por [3]

$$C = B \log \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1.11)$$

donde C es la capacidad máxima del canal con unidades (bits/seg); B es ancho de banda del

canal en (Hz), S es la potencia de señal (W) y N es la potencia de ruido también en (W).

Si se analiza la Ecuación (1.11) se puede observar que hay tres maneras de mejorar la capacidad del canal, aumentando el ancho de banda, aumentando la potencia de la señal o disminuyendo el ruido. Sin embargo, también es posible observar que la capacidad del canal (y por lo tanto la velocidad de datos) aumenta linealmente al incrementar B y logarítmicamente con S , a pesar de que la potencia de ruido es directamente proporcional al ancho de banda se puede obtener una mayor ventaja al incrementar el ancho de banda. Por lo tanto, se puede asegurar que, a mayor ancho de banda, mayor es la capacidad de canal lo cual es el caso de los sistemas de UWB [17].

A continuación se describirán las principales propiedades de los sistemas de comunicación y se hará una ligera comparación entre los sistemas de UWB y los sistemas de banda angosta y banda ancha usados comercialmente.

1.3.2. Densidad espectral de potencia

La densidad espectral de potencia (PDS, *Power Spectral Density*) en los sistemas de UWB se considera extremadamente baja, lo cual se puede observar de su expresión matemática [3]:

$$PDS = \frac{P}{B} \quad (1.12)$$

donde P es la potencia de transmisión (W) y como B es el ancho de banda de la señal (Hz), entonces la densidad espectral de potencia (W/Hz) en sistemas de UWB es menor que en sistemas de banda angosta o estrecha debido a su gran ancho de banda.

La razón de lo anterior se debe a que como la frecuencia y el tiempo son inversamente proporcionales, las señales sinusoidales suelen ser de banda estrecha y de larga duración de tiempo, mientras que los sistemas de UWB que usan pulsos de corta duración y por tanto se caracterizan por su gran ancho de banda. Se puede observar en la Tabla 1.2 una comparación de la densidad espectral de potencia en distintos sistemas de comunicación [3].

Sistema	Potencia de transmisión	Ancho de Banda	Densidad espectral de potencia (W/MHz)	Clasificación
Radio	50 kW	75 kHz	666600	banda estrecha
Televisión	100 kW	6 MHz	16700	banda estrecha
2G Celular	10 mW	8.33 kHz	1.2	banda estrecha
802.11a	1 W	20 MHz	0.05	banda ancha
UWB	1 mW	7.5 GHz	0.013	banda ultra ancha

Tabla 1.2: Densidad espectral de potencia de los sistemas de comunicación inalámbrica más comunes

Es posible observar que la transmisión por radio y televisión tiene una densidad espectral de potencia mucho más grande debido a que utilizan una gran potencia para transmitir en un

ancho de banda estrecho, en comparación las tecnologías de banda ancha y ultra ancha tienen una densidad espectral de potencia mucho menor al distribuir bajos niveles de potencia en anchos de banda más grandes. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los alcances requeridos por cada uno de los sistemas comparados son muy distintos, mientras los primeros requieren alcances de cientos de kilómetros los últimos requieren un alcance de unos metros por lo que esa es la razón en la diferencia de potencia.

Para los sistemas de UWB la energía se distribuye en un ancho de banda muy grande y en general, contiene una densidad de potencia muy pequeña. Aunque existen excepciones a esta regla como los sistemas de radar de UWB los cuales transmiten a alta potencia [3]. Sin embargo, en este trabajo el enfoque será en los sistemas de comunicación.

1.3.3. Tren de pulsos

Es importante mencionar que los sistemas de UWB envían la información a través de una secuencia de pulsos en lugar de un solo pulso. Esta secuencia se conoce como *tren de pulsos* y se modula en formato PPM (*Pulse Position Modulation*) con intervalos de tiempo pseudoaleatorios. Esto también hace posible una alta precisión en aplicaciones de localización y detección. Un ejemplo de *tren de pulsos* se muestra en la Figura 1.5.

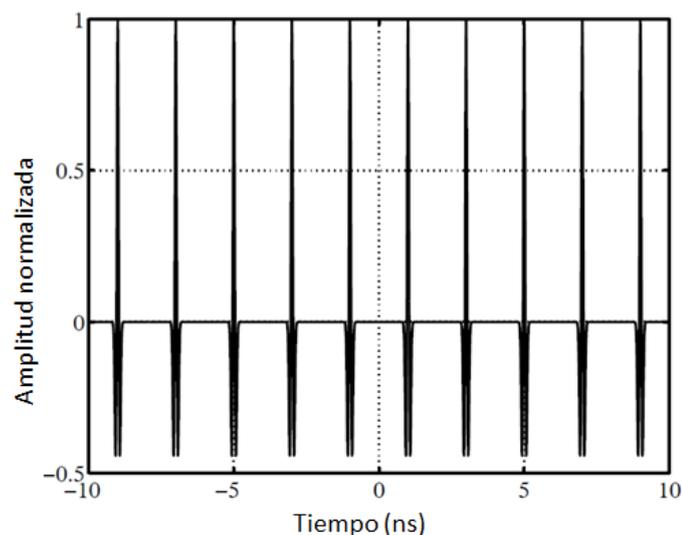


Figura 1.5: Tren de pulsos de un sistema UWB

1.3.4. Capacidad espacial y espectral

Otra propiedad básica en los sistemas de comunicación de UWB es la capacidad espacial medida en (bps/m^2). La capacidad espacial se puede calcular como la máxima velocidad de transmisión dividida entre el área sobre la cual el sistema puede transmitir [3]. El área de transmisión puede ser calculada de forma circular considerando el transmisor en el centro. Así:

$$\text{Capacidad espacial} = \frac{\text{Máxima velocidad de transmisión}}{\text{Área de transmisión}} \quad (1.13)$$

$$\text{Área de transmisión} = \pi \times (\text{Distancia de transmisión})^2 \quad (1.14)$$

En la ecuación (1.14) la distancia de transmisión es el máximo alcance del transmisor.

Por otro lado, los sistemas de banda angosta suelen medirse con la capacidad espectral, medida en (bps/Hz), esto debido a que por lo general están limitados principalmente por el espectro de frecuencia [3]. Entonces, esta cantidad se puede expresar como,

$$\text{Capacidad espectral} = \frac{\text{Máxima velocidad de transmisión}}{\text{Ancho de banda}} \quad (1.15)$$

En la Tabla 1.3 se muestra una comparación entre sistemas inalámbricos respecto a ambas capacidades. Para sistemas de UWB, la potencia se mantiene baja lo cual es compensado por el gran ancho de banda. Como se puede observar, si se compara la densidad espectral resulta que en los sistemas de UWB es más baja, sin embargo, si se compara la capacidad espacial, entonces los sistemas de UWB son significativamente más eficientes.

Sistema	Velocidad de transmisión (Mbps)	Distancia de transmisión (m)	Capacidad espacial (kbps/m ²)	Ancho de banda	Capacidad espectral (bps/Hz)
UWB	100	10	318.31	7.5 GHz	0.013
IEEE 802.11a	54	50	6.87	20 MHz	2.7
Bluetooth 4.0	24	10	3.18	83.5 MHz	0.287
IEEE 802.11b	11	100	0.350	83.5 MHz	0.1317

Tabla 1.3: Comparación de capacidad espacial y espectral de varios sistemas inalámbricos en interiores [3].

1.3.5. Velocidad de transmisión de datos

Una de las principales ventajas de los sistemas de comunicación UWB es su gran velocidad de transmisión de datos. Como puede observarse en la Tabla 1.4, actualmente estos sistemas poseen una tasa de transmisión alrededor de 110 a 480 Mbps [18], lo cual es equivalente a la transmisión de Ethernet por cable USB 2.0, de 100 a 500 veces la velocidad de transmisión por Bluetooth, alrededor de 50 veces superior al estándar 802.11b, y 9 veces al de 802.11a.

La velocidad de transmisión para la tecnología UWB está actualmente estandarizada dentro de tres diferentes velocidades: 110 Mbps a una distancia mínima de 10 m, 200 Mbps a una distancia de 4 m y 480 Mbps a menos de 1 m [3].

Sistema de transmisión	Velocidad de transmisión (Mbps)
UWB, USB 2.0	480
UWB (4 m), 1394.a (4.5 m)	200
UWB (10 m)	110
Fast Ethernet	90
802.11a	54
802.11g	20
802.11b	11
Ethernet	10
Bluetooth	1

Tabla 1.4: Comparación de velocidad de transmisión entre la tecnología UWB y otras tecnologías de transmisión [3].

1.4. Tiempo de arribo (ToA) de la señal

Como se ha mencionado previamente, para la realización de este trabajo se ha optado por el uso de la tecnología de radio frecuencia de banda ultra ancha. Como se verá en el Capítulo 5, se decidió utilizar los módulos DWM1001 [19] debido a su excelente precisión al estimar la distancia entre módulos y de la estimación de un objetivo a partir de anclas estáticas. Como parte de las características de estos módulos se tiene que utilizan la técnica *Two-Way Ranging* basada en el método de tiempo de arribo de la señal para realizar la estimación de distancia y posteriormente utilizan el método de máxima verosimilitud para la estimación de posición. A continuación se explicará a mayor detalle el método basado en tiempo de arribo de la señal, así como las dos principales técnicas de medición por este método, esto con el fin de entender mejor el trabajo realizado por los módulos DWM1001.

El método basado en el tiempo de arribo (ToA, *Time of Arrival*) utiliza el tiempo de retardo en la propagación de la señal para estimar la distancia entre nodo y ancla, esto sabiendo que la señal se propaga con la velocidad de la luz c . Para este método es necesario sincronizar tanto el nodo como cada una de las anclas con el fin de conocer el tiempo exacto de propagación de la señal. Existen dos técnicas clásicas de medición de distancia en el método ToA: *One Way Ranging* (OWR) y *Two Way Ranging* (TWR) [20].

La técnica OWR se basa en la transmisión de una señal entre el nodo y un ancla como se muestra en la Figura 1.6. En esta técnica es necesaria una correcta sincronización. El tiempo de arribo es medido como la diferencia entre el tiempo de recepción registrado en el ancla y el tiempo de transmisión registrado en el nodo, por lo tanto la dificultad de este método reside en alcanzar una sincronización perfecta entre el nodo y las anclas. Así, bajo la suposición de sincronización perfecta se tiene que:

$$ToA_{OWR} = T_1 - T_0 \quad (1.16)$$

Por otra parte, en la técnica TWR no es necesaria una sincronización ya que se basa en

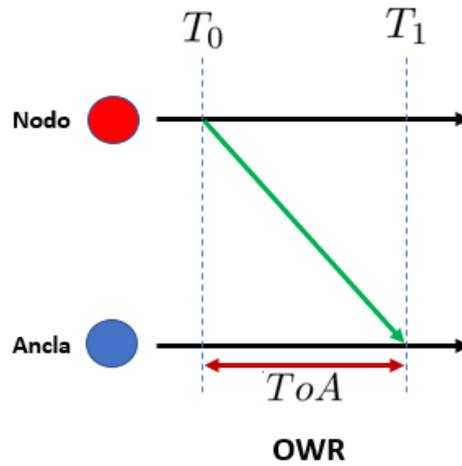


Figura 1.6: Técnica OWR para la medición de distancia a partir del ToA

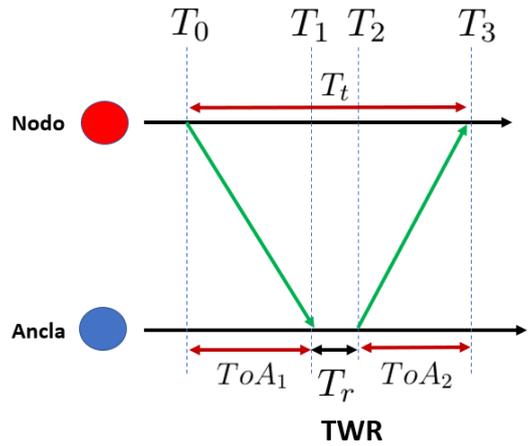


Figura 1.7: Técnica TWR para la medición de distancia a partir del ToA

la transmisión de dos señales simétricas entre el nodo y el ancla, con tiempos de arribo ToA_1 y ToA_2 , como se muestra en la Figura 1.7. El nodo envía primero paquetes al ancla por lo que esta responde con un paquete que contiene información temporal de sincronización; esta información permite calcular el retardo de propagación. Se debe considerar que existe un corto periodo de tiempo el cual tarda el ancla en responder el mensaje T_r [21]. Por lo tanto, como se muestra en la Figura 1.7 el tiempo de arribo de la señal está dado por

$$ToA_{TWR} = \frac{T_t - T_r}{2} = \frac{(T_1 - T_0) + (T_3 - T_2)}{2} \quad (1.17)$$

Métodos de posicionamiento

Hasta aquí se han expuesto los métodos de localización por radiofrecuencia más utilizados por los RTLS (RSS, ToA, TDoA, AoA) y los principios involucrados en el fenómeno de propagación de la señal con el fin de comprender la forma de calcular la distancia entre un dispositivo transmisor y un receptor. En este capítulo se presentarán algunos de los métodos más utilizados en la literatura para la estimación de la posición de un robot móvil. Para fines de este trabajo, la explicación se centra en la posición de un UAV, sin embargo, cabe resaltar que los métodos presentados en este capítulo pueden ser utilizados para la localización de cualquier robot o estación móvil. Los métodos que se presentarán son ampliamente conocidos incluyendo los métodos de Máxima Verosimilitud, Gauss-Newton y Quasi-Newton además del método de Ejes Radicales que a diferencia de los anteriores, no es ampliamente conocido, pero ha demostrado tener un excelente desempeño en términos de precisión en la estimación.

2.1. Conceptos preliminares

Como se había comentado anteriormente, al contar con tres estaciones bases o también llamadas *anclas* (principalmente para los RTLS) cuya posición es conocida, es posible determinar la posición del nodo o vehículo en cuestión en el plano XY utilizando los métodos de trilateración o triangulación, y si se desea estimar la posición en el espacio XYZ se requerirá de al menos 4 anclas posicionadas en diferentes alturas [22].

La triangulación es el método más usado en la literatura para la localización por radiofrecuencia. La triangulación utiliza la geometría del triángulo para determinar la posición y puede categorizar en dos diferentes métodos, trilateración y angulación [23]. A continuación se da una breve explicación de cada uno de estos métodos.

2.1.1. Trilateración

Trilateración es un método para encontrar la posición de un nodo desconocido basándose en las distancias entre el nodo y las anclas como se muestra en la Figura 2.1. Supóngase que las coordenadas del nodo D son (x, y) y las coordenadas de las tres anclas A , B , y C son (x_a, y_a) , (x_b, y_b) y (x_c, y_c) respectivamente. Supóngase también que las distancias desde D a las anclas

A , B y C son denotadas respectivamente por d_a , d_b y d_c . A partir de esta información se puede generar el siguiente sistema de ecuaciones.

$$\begin{aligned}(x - x_a)^2 + (y - y_a)^2 &= d_a^2 \\ (x - x_b)^2 + (y - y_b)^2 &= d_b^2 \\ (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 &= d_c^2\end{aligned}\tag{2.1}$$

Resolviendo este sistema se puede obtener el valor de las incógnitas (x, y) .

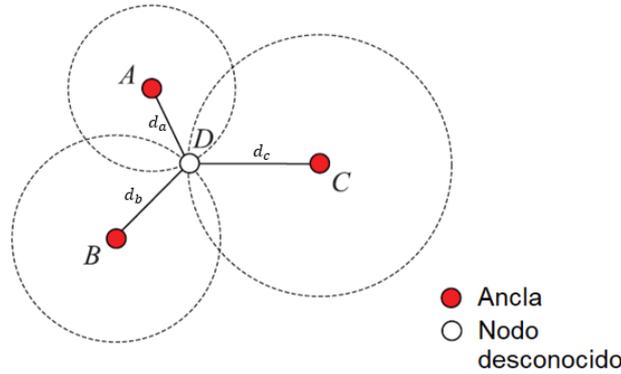


Figura 2.1: Ejemplo de trilateración

Por otro lado, si el nodo desconocido se encuentra en un espacio 3D como puede ser el caso de un UAV, entonces su posición estará dada por la intersección de cuatro esferas generando así el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}(x - x_a)^2 + (y - y_a)^2 + (z - z_a)^2 &= d_a^2 \\ (x - x_b)^2 + (y - y_b)^2 + (z - z_b)^2 &= d_b^2 \\ (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + (z - z_c)^2 &= d_c^2 \\ (x - x_d)^2 + (y - y_d)^2 + (z - z_d)^2 &= d_d^2\end{aligned}\tag{2.2}$$

Sin embargo, con el fin de simplificar el problema es común considerar que 3 de las 4 anclas se encuentran en la misma altura. Además, la geometría se puede simplificar usando el método de Fang [24]. Este método se basa en la traslación de la posición de una de las anclas al origen, otra a lo largo del eje X y la tercera de forma ortogonal respecto a las dos anteriores como se muestra en la Figura 2.2, donde A_1 , A_2 y A_3 corresponden a las coordenadas trasladadas de las anclas A , B y C respectivamente. Por último, en el método de Fang la cuarta ancla con diferente altura es utilizada para corroborar su posición en el eje Z .

Por lo tanto, el sistema de ecuaciones simplificado resulta como:

$$\begin{aligned}x^2 + y^2 + z^2 &= d_a^2 \\ (x - x_2)^2 + y^2 + z^2 &= d_b^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + z^2 &= d_c^2\end{aligned}\tag{2.3}$$

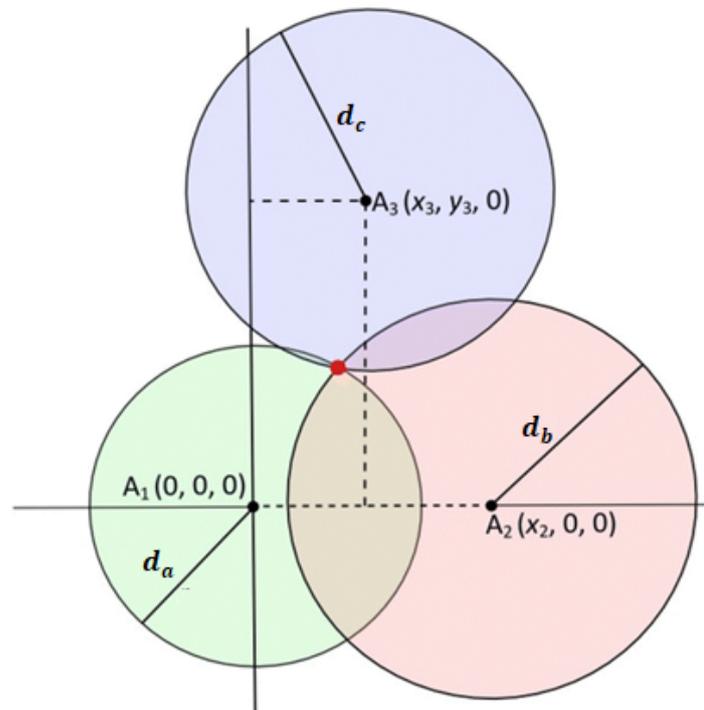


Figura 2.2: Simplificación de trilateración en 3D.

Resolviendo el sistema de ecuaciones dado en (2.3) es posible obtener la siguiente solución

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{d_a^2 - d_b^2 + x_2^2}{2x_2} \\
 y &= \frac{d_a^2 - d_c^2 + x_3^2 + y_3^2 - (2x_3x)}{2y_3} \\
 z &= \pm \sqrt{d_a^2 - x^2 - y^2}
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Debido a que es probable que el valor de z tenga dos posibles soluciones, al sustituir los valores obtenidos de (2.4) en la cuarta ecuación de (2.2), donde el ancla se encuentra en una altura distinta, es posible determinar el verdadero valor de z .

2.1.2. Angulación

La angulación a diferencia de la trilateración utiliza los ángulos en lugar de las distancias para determinar la posición. Aunque en algunos trabajos se conoce este método con el nombre de “triangulación” y la forma de calcular la posición varía de un trabajo a otro [25], [26], [27]. En general, es necesario conocer las posiciones de dos anclas A y B y las mediciones de sus respectivos ángulos ϕ_a y ϕ_b como se muestra en la Figura 2.3.

La manera más común para determinar la posición es utilizar las coordenadas geométricas para escribir las ecuaciones de las pendientes formadas entre las anclas y el nodo que se desea estimar

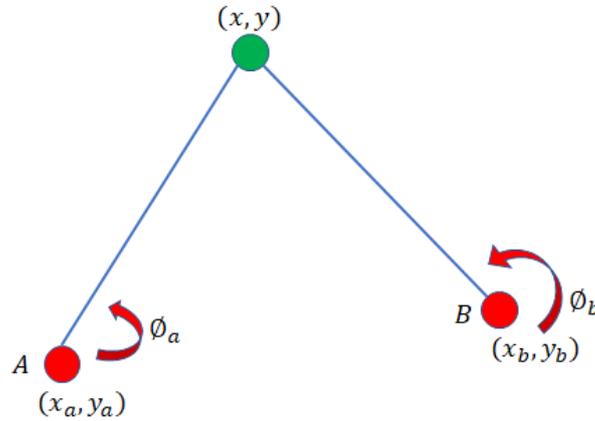


Figura 2.3: Ejemplo de triangulación

$$\tan(\phi_a) = \frac{y - y_a}{x - x_a} \quad (2.5)$$

$$\tan(\phi_b) = \frac{y - y_b}{x - x_b} \quad (2.6)$$

Resolviendo las Ecuaciones (2.5) y (2.6) para x y y se obtiene la posición a estimar

$$\begin{aligned} x &= \frac{(y_a - y_b) + x_b \tan(\phi_b) - x_a \tan(\phi_a)}{\tan(\phi_b) - \tan(\phi_a)} \\ y &= \frac{(y_a \tan(\phi_b) - y_b \tan(\phi_a)) + (x_b - x_a) \tan(\phi_b) \tan(\phi_a)}{\tan(\phi_b) - \tan(\phi_a)} \end{aligned} \quad (2.7)$$

2.1.3. Sistemas sobre-determinados

Como se mencionó anteriormente, el número de anclas N mínimo requerido para la estimación de posición para el plano 2D es de $N = 3$ y de $N = 4$ para un espacio 3D. Sin embargo, estas condiciones son válidas para casos ideales donde la unicidad de la solución está garantizada. No obstante, para los casos prácticos donde los errores de medición de distancia o de ángulos están presentes, es muy posible que los métodos de trilateración y triangulación con el mínimo número de anclas requerido puedan no ser suficientes para encontrar la solución al problema de localización. Es por este motivo que se recomienda ampliamente hacer uso de sistemas sobre-determinados, es decir, se utiliza un mayor número de anclas con el fin de compensar los errores de medición presentes. En este caso se tiene que este sistema sobre-determinado se relaciona con las distancias medidas entre cada ancla y el UAV creando así el siguiente sistema de ecuaciones

$$\begin{aligned}
A_1 : (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 &= \hat{d}_1^2 \\
A_2 : (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 &= \hat{d}_2^2 \\
&\vdots \\
A_N : (x - x_N)^2 + (y - y_N)^2 &= \hat{d}_N^2
\end{aligned} \tag{2.8}$$

donde (x, y) representa la posición del UAV a estimar, N es el número de anclas cuya posición es conocida y denotada como (x_i, y_i) con $i = 1, 2, \dots, N$, así mismo \hat{d}_i representa la distancia medida entre la i -ésima ancla y el UAV.

2.2. Métodos de localización

Como se explicó en el Capítulo 1, la distancia ente anclas y el UAV se puede calcular por medio del ToA. Sin embargo, debido a que dichas estimaciones de distancias presentan cierto error de medición, no es posible asegurar que el sistema de ecuaciones tendrá siempre una solución. Además, debido a que este trabajo está centrado en la localización de UAVs los cuales pueden desplazarse en un espacio 3D, por tal motivo, los métodos que se presentan a continuación consideran los errores de distancia dados por

$$e_i(x, y) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} - \hat{d}_i \tag{2.9}$$

Lo anterior debido a que la intención de los métodos de posicionamiento es el de minimizar los errores. En especial los métodos de Gauss-Newton y Quasi-Newton (que son métodos de optimización) requieren de una función objetivo por medio de la cual se busca obtener la mejor estimación posible donde los errores sean mínimos [28]. Para eso se utilizará como función objetivo la raíz del error cuadrático medio (RMSE *Root Mean Squared Error*) de la posición estimada $\mathbf{p} = (x, y, z)^T$. Esta función está dada por la siguiente expresión:

$$F(\mathbf{p}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2(x, y)} \tag{2.10}$$

En general los métodos más comunes para resolver problemas no lineales como el sistema de ecuaciones mostrado en (2.8) a partir de la minimización de los errores incluyen el método de Gauss-Newton, Quasi-Newton y Levenberg-Marquardt. A continuación se presentarán los primeros dos métodos enfocados en la estimación de la posición.

2.2.1. Gauss-Newton

El método de Gauss-Newton es un método iterativo que se usa para resolver problemas no lineales de mínimos cuadrados y consiste en linealizar la función objetivo (2.10). Al ser un método iterativo se requiere una ecuación de iteración dada por

$$\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{p}_k + \mathbf{S}_k \tag{2.11}$$

donde \mathbf{p}_k es la posible solución o estimación de posición obtenida en la k -ésima iteración y \mathbf{S}_k es el vector direccional con el cual la posición estimada será actualizada iterativamente hasta alcanzar una tolerancia de error ϵ . Para esto, en primer lugar se requiere proporcionar una estimación inicial ó vector de parámetros iniciales, en este caso tomando el lugar de $k = 1$, es decir, $F(\mathbf{p}_1)$. Con el fin de calcular las siguientes iteraciones se aproxima la función objetivo $F(\mathbf{p})$ utilizando una serie de Taylor de segundo orden al considerar que sus derivadas son continuas

$$F(\mathbf{p}_k + \mathbf{S}_k) \approx F(\mathbf{p}_k) + \mathbf{g}_k^T \mathbf{S}_k + \frac{1}{2} \mathbf{S}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{S}_k \quad (2.12)$$

donde \mathbf{g}_k es el vector gradiente cuyos elementos son las primeras derivadas parciales de la función objetivo en el punto \mathbf{p}_k y está dado por

$$\mathbf{g}_k = \left[\left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{\mathbf{p}=\mathbf{p}_k}, \left. \frac{\partial F}{\partial y} \right|_{\mathbf{p}=\mathbf{p}_k}, \left. \frac{\partial F}{\partial z} \right|_{\mathbf{p}=\mathbf{p}_k} \right] = \mathbf{J}_k^T F(\mathbf{p}_k) \quad (2.13)$$

donde \mathbf{J}_k es la matriz Jacobiana de la función objetivo. Por otro lado, $\mathbf{H}(p_k)$ representa la matriz Hessiana con las segundas derivadas parciales de la función objetivo la cual también puede describirse como

$$\mathbf{H}_k = \mathbf{J}_k^T \mathbf{J}_k \quad (2.14)$$

Ya que se busca encontrar los valores de \mathbf{S}_k de tal forma que el punto $(\mathbf{p}_k + \mathbf{S}_k)$ sea la solución que minimiza la ecuación y donde $F'(\mathbf{p}) = 0$, será necesario derivar el lado derecho de la Ecuación (2.12) respecto a \mathbf{S}_k e igualando a cero con el fin de minimizar la función objetivo, Así:

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{S}_k} \left(F(\mathbf{p}_k) + \mathbf{g}_k^T \mathbf{S}_k + \frac{1}{2} \mathbf{S}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{S}_k \right) = 0 \quad (2.15)$$

$$\mathbf{g}_k^T + \mathbf{H}_k \mathbf{S}_k = 0 \quad (2.16)$$

Al sustituir las Ecuaciones (2.13) y (2.14) en (2.16) y despejando \mathbf{S}_k se obtiene la ecuación del vector direccional que ayudará a encontrar la solución de la función objetivo.

$$\mathbf{S}_k = -(\mathbf{J}_k^T \mathbf{J}_k)^{-1} \mathbf{J}_k^T F(\mathbf{p}_k) \quad (2.17)$$

2.2.2. Quasi-Newton

El método de Quasi-Newton puede ser considerado como una variante del método de Gauss-Newton en el cual el valor de la matriz Hessiana $\mathbf{H}(p_k)$ puede ser aproximado por una matriz definida positiva simétrica \mathbf{B}_k .

$$\mathbf{s}_k = -\mathbf{B}_k \mathbf{g}_k \quad (2.18)$$

Una forma de obtener el valor de \mathbf{B}_k es utilizando la fórmula de Davidon-Fletcher-Powell (DFP) dada por [28]

$$\mathbf{B}_{k+1} = \mathbf{B}_k + \frac{\mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^T}{\mathbf{h}_k^T \mathbf{q}_k} - \frac{\mathbf{B}_k \mathbf{q}_k \mathbf{q}_k^T \mathbf{B}_k}{\mathbf{q}_k^T \mathbf{B}_k \mathbf{q}_k} \quad (2.19)$$

donde

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_k &= \mathbf{p}_{k+1} - \mathbf{p}_k \\ \mathbf{q}_k &= \mathbf{g}_{k+1} - \mathbf{g}_k \end{aligned}$$

La matriz inicial \mathbf{B}_1 puede ser cualquier matriz definida positiva. Por lo general, la matriz identidad es utilizada en caso de no haber una mejor estimación.

2.2.3. Máxima Verosimilitud

El método de máxima verosimilitud (MLE *Maximum Likelihood Estimation*) es uno de los más utilizados para la solución del problema de estimación de posición debido a que este problema en particular presenta diversos factores de naturaleza aleatoria. Utilizando un modelo estadístico para caracterizar los errores en la estimación de posición, es posible entonces obtener los parámetros del modelo utilizando el principio de máxima verosimilitud el cual establece: “*Dada una muestra aleatoria X_1, \dots, X_n y los parámetros $f(x_1, \dots, x_n; \theta)$ de un modelo estadístico, se eligen como la solución del problema de estimación $\hat{\theta}$, los valores de θ que maximizan la función de verosimilitud*” [30].

Como se mencionó anteriormente, para el caso de dos dimensiones (XY) es posible estimar la posición al resolver un sistema de tres ecuaciones, pero para el caso de un sistema sobre-determinado con N ecuaciones como se muestra en (2.8) es posible generar un conjunto de N_s posibles soluciones $\rho_i = (\hat{x}_i, \hat{y}_i)$ con $i = 1, \dots, N_s$. Por ejemplo, si $N = 4$ es posible generar un total de cuatro combinaciones de tres ecuaciones distintas con el fin de obtener $N_s = 4$ posibles soluciones (en el caso de que alguna combinación de ecuaciones no tenga solución se descarta).

Las posibles soluciones ρ_i serán consideradas como datos muestrales del modelo estadístico que hace referencia a la posición real del UAV $f(\rho | (x, y))$. Por lo tanto, para encontrar la posición más probable en la que se encuentra el UAV será necesario maximizar la siguiente función de verosimilitud denotada por \mathcal{L} [31]

$$\mathcal{L}(\hat{P}(x, y)_{ML}) = \arg \max \prod_{i=1}^N f(P; \rho_i, \sigma) \quad (2.20)$$

Aunque existen diversos trabajos donde se demuestra que los errores de distancia y localización no siempre tienen una distribución Gaussiana [32], en la literatura es la distribución más utilizada debido al Teorema del Límite Central [33], [34]. Por lo tanto, en este trabajo para fines comparativos se considerará que la distribución de probabilidad de los errores para cada uno de los ejes es de naturaleza Gaussiana por lo que puede ser representados por las siguientes funciones de densidad de probabilidad

$$f(P_x; \rho_{xi}, \sigma_x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(P_x - \rho_{xi})^2}{2\sigma_x^2} \right] \quad (2.21)$$

$$f(P_y; \rho_{yi}, \sigma_y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(P_y - \rho_{yi})^2}{2\sigma_y^2} \right] \quad (2.22)$$

donde σ_x y σ_y son la desviación estándar en los ejes X y Y respectivamente. En un sistema homogéneo, todas las estimaciones de distancia y posición tendrán la misma desviación estándar.

2.2.4. Ejes Radicales

Este método de posicionamiento está basado en el concepto de eje radical, donde cada ecuación en (2.8) es considerada como una circunferencia A_i de radio d_i con centro en (x_i, y_i) . El concepto de eje radical dado en [35] dice: “El eje radical formado por dos circunferencias A_i y A_j es una línea perpendicular a la línea que conecta a sus centros; si las circunferencias A_i y A_j se tocan entre sí en dos diferentes puntos, su eje radical coincidirá con la cuerda que comparten ambas circunferencias, es decir, aquella que conecta ambos puntos; si las circunferencias A_i y A_j son tangentes entre sí, tocándose en un solo punto, el eje radical será aquella tangente en común que pasa por ese punto; y por último, si las circunferencias A_i y A_j no tienen ningún punto en común, su eje radical tampoco tendrá ningún punto en común con ellas. El eje radical será el lugar geométrico donde las longitudes de las tangentes trazadas a ambas circunferencias sean iguales.”. En la Figura 2.4 se muestra de forma clara el eje radical de dos circunferencias para los tres casos mencionados.

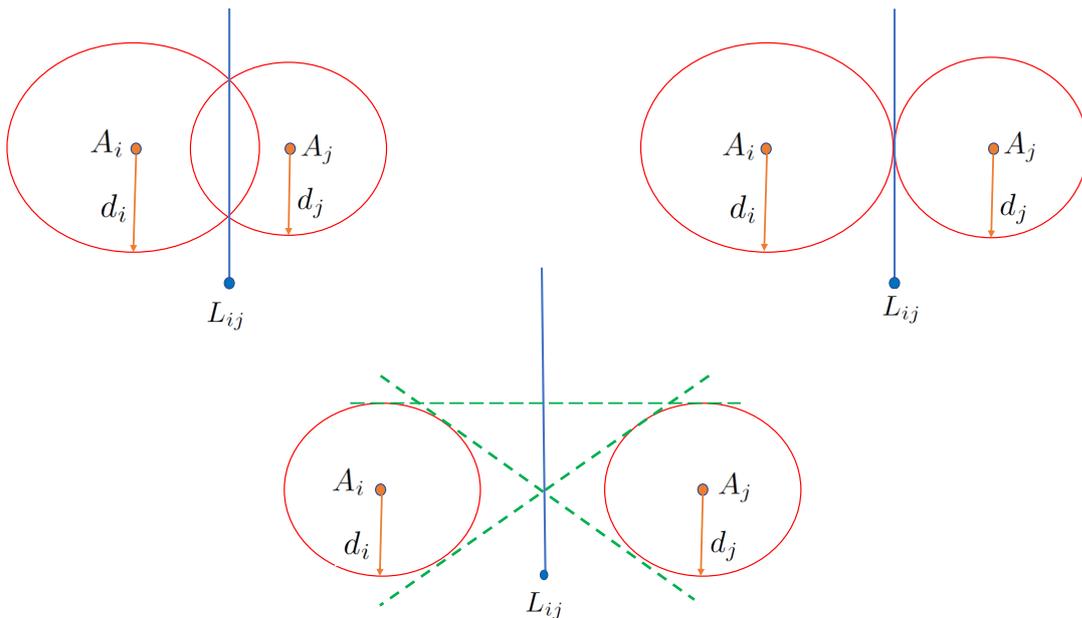


Figura 2.4: Eje radical de dos circunferencias: a) cuando las circunferencias se tocan en dos puntos, b) cuando se tocan en un solo punto y c) cuando ambas circunferencias no se tocan

La ecuación característica del eje radical, L_{ij} , para un par de circunferencias A_i y A_j resulta de un simple resta de ambas ecuaciones $A_i - A_j$ la cual al desarrollarse se obtienen las siguientes ecuaciones

$$L_{ij} = A_i - A_j \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} L_{ij} : (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 - \hat{d}_i^2 \\ - (x - x_j)^2 - (y - y_j)^2 + \hat{d}_j^2 = 0 \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} L_{ij} : 2(x_j - x_i)x + 2(y_j - y_i)y \\ + x_i^2 - x_j^2 + y_i^2 - y_j^2 + \hat{d}_j^2 - \hat{d}_i^2 = 0 \end{aligned} \quad (2.25)$$

La Ecuación (2.25) puede ser expresada de la siguiente manera

$$L_{ij} : a_{ij}x + b_{ij}y + c_{ij} = 0 \quad (2.26)$$

donde

$$\begin{aligned} a_{ij} &= 2(x_j - x_i) \\ b_{ij} &= 2(y_j - y_i) \\ c_{ij} &= x_i^2 - x_j^2 + y_i^2 - y_j^2 + \hat{d}_j^2 - \hat{d}_i^2 \end{aligned} \quad (2.27)$$

A partir de la ecuación característica del eje radical es posible estimar la posición del UAV usando al menos tres ejes radicales como se muestra en la Figura 2.5, donde se observa que es posible aproximar la posición utilizando la intersección de los ejes radicales L_{12} , L_{13} y L_{23} generados a partir de las circunferencias A_1 , A_2 y A_3 . Por lo tanto, la posición estimada resulta de la siguiente ecuación

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix}_{RA} = \mathbf{A}^+ \mathbf{c} \quad (2.28)$$

donde (\hat{x}, \hat{y}) es la posición estimada, la matriz \mathbf{A} está formada por los valores de a_{ij} y b_{ij} de las combinaciones posibles entre las N anclas. De igual manera el vector \mathbf{c} se forma a partir de los valores de todas las c_{ij} posibles y \mathbf{A}^+ denota la pseudoinversa de la matriz \mathbf{A} ya que así se permite encontrar la solución por ajuste de mínimos cuadrados incluso si el sistema de ecuaciones lineales no tiene solución ó tiene múltiples soluciones [36].

Por ejemplo, para el caso de $N = 4$ se tienen 6 combinaciones de pares de anclas. Por lo tanto, los valores de la matriz \mathbf{A}^+ y el vector c_{ij} son dados por

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{12} & b_{12} \\ a_{13} & b_{13} \\ a_{14} & b_{14} \\ a_{23} & b_{23} \\ a_{24} & b_{24} \\ a_{34} & b_{34} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

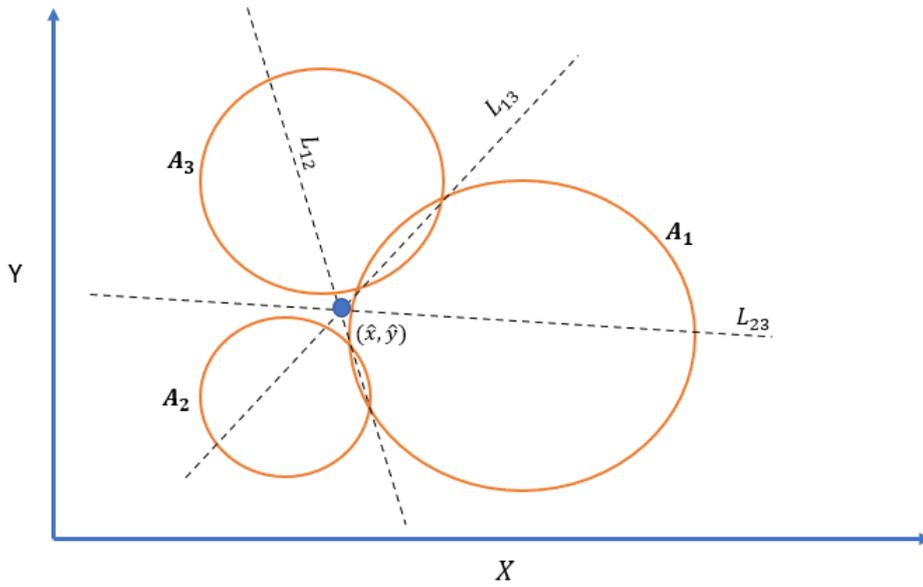


Figura 2.5: Ejemplo de estimación de posición usando tres ejes radicales.

$$\mathbf{c} = [c_{12} \ c_{13} \ c_{14} \ c_{23} \ c_{24} \ c_{34}]^T \quad (2.30)$$

2.3. Comparación entre los métodos de posicionamiento

Por último, a continuación se presenta la comparación entre los métodos de localización previamente descritos en términos de exactitud para escenarios en 3D. Con esta finalidad se realizó una simulación en MATLAB donde se utiliza cada uno de los métodos de interés (método de Gauss-Newton, método de Quasi-Newton, método de Máxima Verosimilitud y el algoritmo de Ejes Radicales) para estimar la posición de un UAV que se encuentra dentro de un espacio de $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$. Con la intención de considerar un sistema sobre-determinado se utilizaron 6 anclas, 2 más de las requeridas para la estimación de posición en el espacio 3D. Tanto el UAV como las anclas son posicionadas de manera aleatoria, además, los errores de estimación de distancia entre el UAV y las anclas son determinados de forma aleatoria con distribución Gaussiana y una desviación estándar de $\sigma = 0.1 \text{ m}$.

Para el caso del método de Máxima Verosimilitud primero se estimará la posición utilizando combinaciones de 4 anclas distintas de las 6 disponibles obteniendo así 15 diferentes estimaciones y aplicando el método para conocer la posición más probable. De la misma forma, el algoritmo de Ejes Radicales utiliza las 15 combinaciones posibles de 2 diferentes anclas. Por otro lado, el método iterativo Gauss-Newton se inicializó en la posición $\mathbf{p}_1 = (0, 0, 0)$, mientras que para el método Quasi-Newton se usó para \mathbf{B}_1 la matriz identidad $\mathbf{I}_{3 \times 3}$.

Tras 10,000 corridas de simulación los resultados obtenidos son presentados en la Figura 2.6 utilizando la función de distribución acumulada (CDF *cumulative density probability*) del RMSE obtenido por cada método.

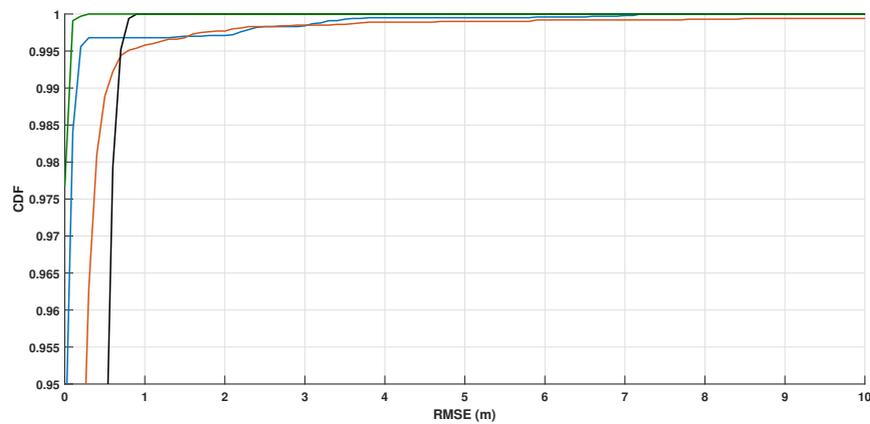


Figura 2.6: CDF del RMSE obtenido por cada método de posicionamiento.

A partir de las CDF mostradas se puede observar que el algoritmo de Ejes Radicales muestra una exactitud de 0.3 m con probabilidad del 100%; de igual manera, el método de Máxima Verosimilitud muestra una exactitud del orden de 0.9 m con probabilidad del 100%. Por otro lado, los resultados muestran que el método de Gauss-Newton y el método Quasi-Newton poseen un mayor error de estimación bajo las condiciones de simulación, sin embargo, la probabilidad de que el error de estimación para el método de Gauss-Newton sea menor a 1 m es del 99.68% mientras que para el método Quasi-Newton es del 99.58% lo cual puede considerarse como un excelente nivel de exactitud.

A pesar de que los resultados mostraron que el algoritmo de Ejes Radicales y el método de Máxima Verosimilitud tuvieron una mejor exactitud en la estimación de posición en un ambiente 3D, es importante mencionar que en [37] se realizó la comparación de los mismos métodos presentados aquí para un ambiente 2D con un total de 4 anclas, donde los métodos que demostraron mejor precisión fueron el método de Gauss-Newton y el método de Quasi-Newton contrario a un ambiente 3D. Así, se puede concluir que todos los métodos aquí estudiados pueden ser considerados para la estimación de la posición de un UAV pero las condiciones de estimación y el número de anclas utilizadas pueden afectar la precisión. En los próximos capítulos se describirá el ambiente de interés para este trabajo de tesis, además se analizarán los métodos estudiados en este capítulo para sistemas no sobre-determinados, es decir, que solo se cuenta con el número mínimo requerido de anclas para la estimación de posición.

Estimación de posición dentro de ambientes suburbanos

En el Capítulo 1 se presentaron los conceptos básicos en la propagación de señales de radiofrecuencia y los modelos de propagación más simples encontrados en la literatura, el modelo de espacio libre y de dos rayos. Sin embargo, estos modelos no tienen en consideración los efectos que introducen las obstrucciones y las trayectorias múltiples que se producen debido a los posibles objetos al rededor del transmisor y el receptor. Debido a que este trabajo se centra en el posicionamiento de UAVs dentro de una zona suburbana con múltiples obstáculos, será necesario un modelo de propagación más adecuado para este tipo de ambiente. Por lo tanto, a continuación se describirán dos de los fenómenos de propagación de la señal que se podrían esperar en un ambiente suburbano, el efecto de ensombrecimientos (*shadowing*) y el efecto que introduce un ambiente de trayectorias múltiples.

En este capítulo también se utilizará un modelo de propagación que tenga en consideración estos fenómenos para comprobar las probabilidades de conexión entre un UAV y las anclas dentro de un ambiente suburbano y se analizará el nivel de macro-diversidad necesario para garantizar la estimación de posición en un vuelo autónomo.

3.1. Efectos de objetos en la recepción de señales transmitidas en ambientes suburbanos

Cuando se habla de un ambiente suburbano se debe tener en cuenta que pueden existir una gran variedad de obstáculos tales como edificios, casas, lomas, árboles, etc. los cuales pueden afectar a la señal transmitida incluso cuando existen condiciones de línea de vista.

Los efectos de atenuación a larga escala considerados en este trabajo serán los producidos por el fenómeno de ensombrecimientos y los efectos de pequeña escala serán dados por el fenómeno de trayectorias múltiples. A continuación se dará una breve explicación de estos fenómenos.

3.1.1. Fenómeno de ensombrecimientos

El fenómeno de ensombrecimientos produce una variación aleatoria de la señal a larga escala debido a los objetos con dimensiones mayores a la longitud de onda que se encuentran entre el transmisor y el receptor. En [38] se ha demostrado que la atenuación aleatoria dada por este fenómeno se puede describir por una función de densidad de probabilidad Log-normal dada por la siguiente ecuación

$$f_{x_{dB}}(x) = \frac{1}{\sigma_{sh}\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma_{sh}^2}\right) \quad (3.1)$$

donde $f_{x_{dB}}$ es la función de densidad de probabilidad de una variable aleatoria X_{dB} , μ es la media en dB y σ_{sh} es la desviación estándar también en dB.

3.1.2. Fenómeno de trayectorias múltiples

El fenómeno de trayectorias múltiples produce una variación a pequeña escala de la señal recibida la cual viaja por medio de diferentes trayectorias como resultado de la reflexión y la difracción de las ondas electromagnéticas al chocar con los objetos que se encuentran entre el transmisor y el receptor. Debido a que las trayectorias que sigue la señal son de diferentes longitudes, la señal y sus réplicas llegan en diferentes tiempos, amplitudes y fases [3].

En el caso de que exista línea de vista o en su defecto haya una componente dominante respecto a las otras, entonces, la señal podrá ser aproximada utilizando la función de densidad de probabilidad Rice [13] dada por la siguiente ecuación

$$f_r(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{r^2 + r_s^2}{2\sigma_r^2}\right) I_0\left(\frac{rr_s}{\sigma_r^2}\right) \quad (3.2)$$

donde I_0 es la función Bessel de primera clase y segundo orden, r_s es la componente dominante y r es la variable aleatoria con desviación estándar σ_r que representa las componentes de trayectorias múltiples. La Figura 3.1 muestra la función de densidad de probabilidad de Rice.

En ocasiones la función de densidad de probabilidad Rice se describe por un parámetro llamado factor K ó *factor de Rice* el cual se define como la relación de potencias entre la componente dominante y las componentes de las trayectorias múltiples. El factor K se puede describir en una escala lineal por la siguiente ecuación

$$K = \frac{r_s^2}{2\sigma_r^2} \quad (3.3)$$

Por lo tanto, la Ecuación (3.2) puede reescribirse en términos de K como:

$$f_r(r) = \frac{2rK}{r_s^2} \exp\left(-\frac{K}{r_s^2}(r^2 + r_s^2)\right) I_0\left(\frac{2rK}{r_s}\right) \quad (3.4)$$

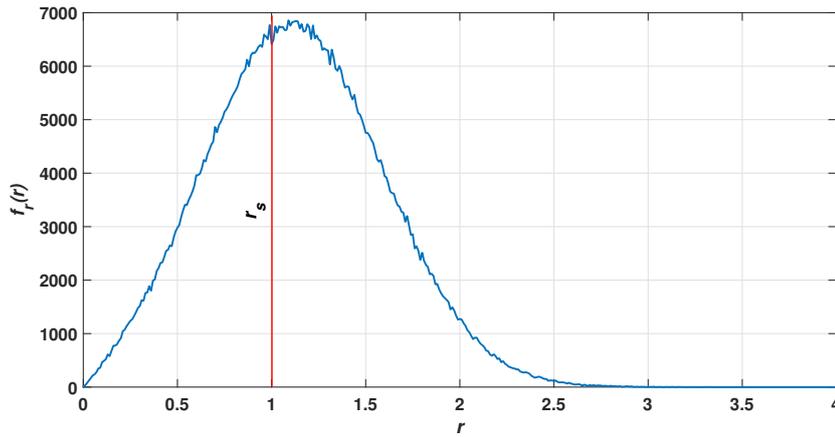


Figura 3.1: Función de densidad de probabilidad Rice.

Sin embargo, es importante notar que (3.4) se encuentra en escala lineal mientras que el factor K por lo general se encuentra en dB por lo que será necesario utilizar una escala lineal de la Ecuación (3.4) la cual puede ser expresada por la siguiente ecuación

$$f_r(r) = \frac{2r10^{K/10}}{r_s^2} \exp\left(-\frac{10^{K/10}}{r_s^2}(r^2 + r_s^2)\right) I_0\left(\frac{2r10^{K/10}}{r_s}\right) \quad (3.5)$$

3.2. Modelo de propagación

Como se vio en el Capítulo 1, el modelo de propagación de espacio libre considera únicamente las características del transmisor y del receptor para determinar la potencia recibida sin objetos obstaculizando o reflejando la señal por lo que la atenuación de la señal depende solamente de la distancia entre el transmisor y el receptor y la frecuencia de operación. Una de las principales características de la propagación de una señal en este modelo es que las pérdidas se incrementan de manera proporcional al cuadrado de la distancia d . El modelo *Log-distance path loss* es la expresión matemática más usada en la literatura para caracterizar las pérdidas por la propagación de la señal en aplicaciones terrestres pero también se puede utilizar para UAVs [39]. Este modelo está dado por la siguiente ecuación

$$PL_{log}(dB) = PL_o + 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right)^2 \quad (3.6)$$

donde PL_o son las pérdidas de la señal observadas a una distancia de referencia d_0 y n es el exponente de las pérdidas por propagación.

Ya que en este trabajo se consideran los desvanecimientos a grande y pequeña escala presentes en ambientes suburbanos, se considerarán también los efectos de ensombrecimientos y trayectorias múltiples modificando el modelo expresado en (3.6). Así, para agregar la variación

de la señal debido al fenómeno de ensombrecimientos bastará con agregar una variable aleatoria Gaussiana X_{dB} de la forma mostrada en (3.1) con media cero y desviación estándar σ_{sh}

$$PL_{sh}(dB) = PL_o + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right)^2 + X_{dB} \quad (3.7)$$

Por último, la variación de la señal considerando el fenómeno de trayectorias múltiples estará dada por la variable aleatoria r de la función de densidad de probabilidad (3.5) considerando que la componente dominante r_s será la obtenida por la Ecuación (3.7).

En la Figura 3.2 se muestra una posible realización de la variación de la señal recibida como se describe por los modelos presentados en función de la distancia. Como se puede observar, los fenómenos de ensombrecimiento y de trayectorias múltiples agregan fuertes variaciones a la señal, principalmente el último fenómeno mencionado.

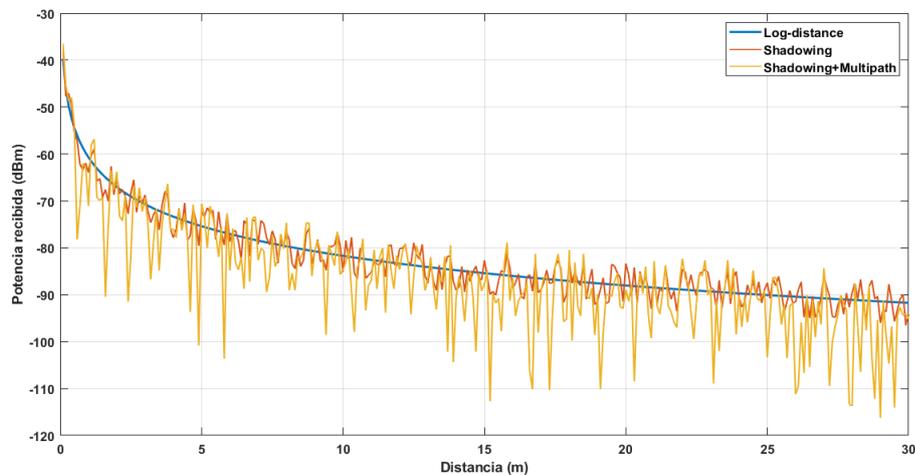


Figura 3.2: Variación de la señal recibida en función de la distancia para diferentes fenómenos de propagación.

Cabe mencionar que en el caso de contar con condiciones de espacio libre el exponente es $n = 2$ y para las condiciones de tierra plana donde la distancia entre terminales es mayor a la altura de las antenas el valor del exponente es $n = 4$ [3]. Sin embargo, debido a la complejidad para los ambientes urbanos y suburbanos con múltiples obstáculos el exponente de pérdidas por propagación es determinado de forma empírica por medio de una serie de mediciones realizadas en el ambiente de interés.

3.3. Niveles de macro-diversidad para posicionamiento de UAVs

Una vez establecido el modelo utilizado para caracterizar la propagación de la señal en ambientes urbanos y suburbanos considerando los fenómenos de ensombrecimiento y de trayectorias múltiples se procederá a analizar cómo influyen estos fenómenos para la estimación de la posición de un UAV que vuela en este tipo de ambientes. Por tal motivo se comparará la probabilidad de conexión entre el UAV y al menos las 4 anclas requeridas para la estimación de posición en un espacio 3D. Con la finalidad de analizar y comparar la probabilidad de conexión en diferentes tipos de ambientes, se utilizará el concepto de macro-diversidad. Este concepto se basa en el hecho de que una misma señal puede ser recibida por distintos dispositivos, terminales o en este caso anclas [40] proporcionando redundancia al sistema de comunicación y mejorando la transmisión de la señal. Es posible encontrar algunos trabajos donde se hace uso del concepto de macro-diversidad para aplicaciones con UAVs. Por ejemplo, el hacer uso de múltiples UAVs como estaciones base móviles con el fin de proporcionar macro-diversidad a las redes celulares en caso de catástrofes o incremento de tráfico de datos [41], [42].

3.3.1. Simulación de macro-diversidad en ambientes semi-boscosos

A continuación se presentará la simulación utilizada para comprobar la probabilidad de conexión en diferentes ambientes semi-boscosos e incrementando los niveles de macro-diversidad.

3.3.1.1. Ambiente de simulación

En la plataforma de simulación aquí presentada un UAV sigue la trayectoria mostrada en la Figura 3.3 dentro de un área de 30×30 m a una altura de 4 m. Sin pérdida de generalidad, el vuelo del UAV inicia en el punto $(-20, 20, 4)$ y finaliza en el punto $(20, -20, 4)$ con una velocidad de 1 m/s por lo cual el tiempo de vuelo es de 250 s.

Las anclas son colocadas a una altura de 1.5 m y distribuidas dentro del área de interés en un arreglo cuadrangular variando la distancia entre ellas y por consecuencia el número de anclas dentro del área de interés. Para esta simulación se decidió utilizar las características de los módulos de UWB DWM1001 mostradas en la Tabla 3.1 debido a su popularidad como un RTLS más usado.

Parámetros	Valores
Potencia de transmisión	-17 dBm
Ganancia de la antena	2.5 dB
Frecuencia central	6.51 GHz
Sensibilidad	-92 dBm

Tabla 3.1: Especificaciones del módulo de UWB DWM1001

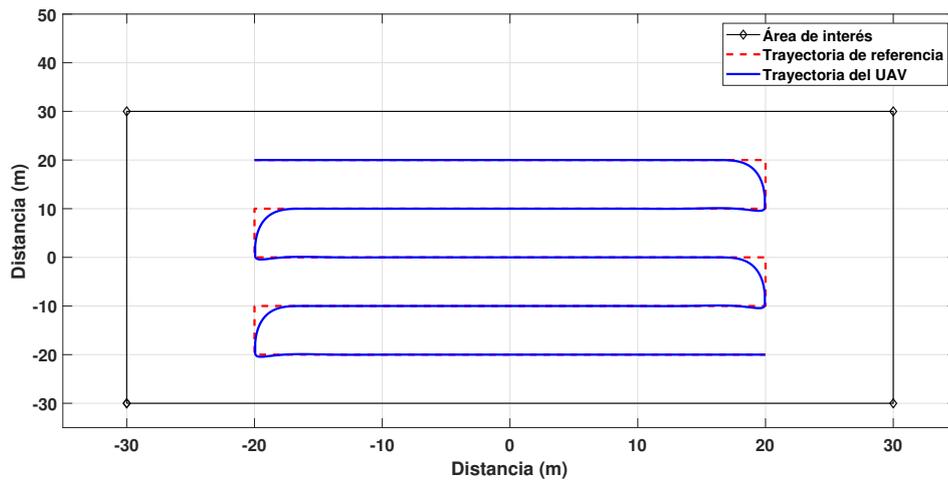


Figura 3.3: Trayectoria del UAV en la simulación

Ya que los fabricantes recomiendan que los módulos se posicionen a máximo 30 m uno de otro, se considerará como una configuración sin macro-diversidad un arreglo cuadrangular con 20 m de separación entre anclas como se muestra en la Figura 3.4. Sin embargo, el alcance especificado por el fabricante considera excelentes condiciones de línea de vista pero mientras mayores son los obstáculos en el ambiente menor es el alcance de los radios por lo que se requerirá un mayor número de anclas para compensar los fenómenos causados por el ensombrecimiento y las trayectorias múltiples. Por tal motivo, en esta simulación se consideran diferentes niveles de macro-diversidad basados en el número de anclas y la distancia entre ellas para lograr cubrir el área de interés, los cuales se muestran en la Tabla 3.2.

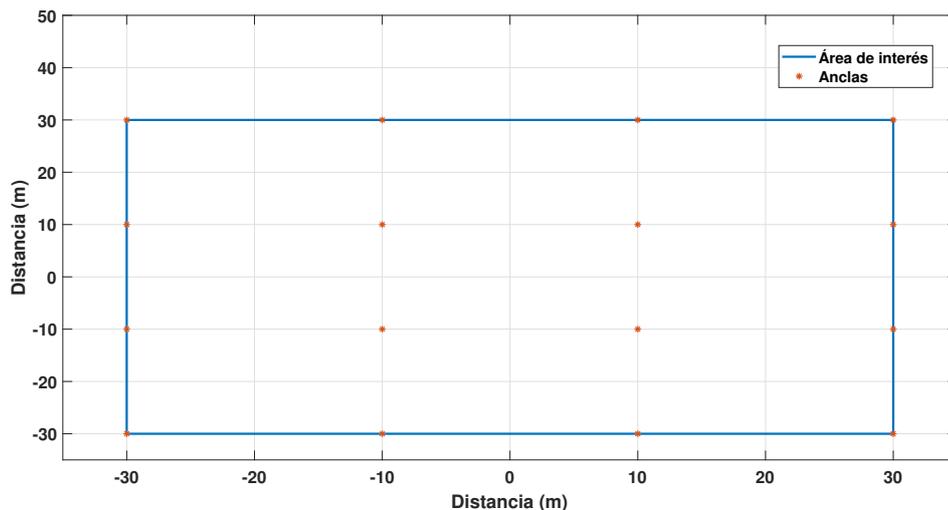


Figura 3.4: Distribución sin macro-diversidad ($N = 16$).

Los distintos escenarios sub-boscosos considerados en la simulación son aquellos encon-

trados en [43], trabajo en el que caracterizaron la propagación de la señal en 4 escenarios con diferentes densidades y tamaños de vegetación los cuales son descritos a continuación:

- Arbustos ligeros: Escenario con pequeños árboles, arbustos y pasto alto. Un diámetro de árboles del orden de 4 cm y una altura menor a 3 m y una separación entre árboles y arbustos de 2-3 m.
- Bosque ligero: Escenario con pequeños árboles de 10 cm de diámetro y hasta 8 m de altura, con una separación de 1-3 m entre árboles.
- Bosque medio: Escenario con árboles pequeños y de mediano tamaño con diámetros que van desde los 2 m hasta los 10 m. La separación entre árboles es de 0.5- 2 m y una altura de hasta 10 m.
- Bosque denso: Escenario pequeños, medianos y grandes árboles con una gran cantidad de arbustos. El diámetro de los árboles supera los 25 cm, tiene una escasa separación de 0.2-1 m y una altura superior a los 15 m.

Número de anclas (N)	Distancia entre anclas (m)
16	20
25	15
49	10
121	6
161	5
441	3

Tabla 3.2: Niveles de macro-diversidad basados en el número de anclas.

En la Tabla 3.3 se muestran los parámetros necesarios para caracterizar el fenómeno de trayectorias múltiples los cuales fueron obtenidos en [43] a partir de las mediciones realizadas para cada uno de los ambientes mencionados con radios de UWB. De igual manera, para agregar la variable aleatoria característica del fenómeno de ensombrecimiento se usó como referencia las mediciones presentadas en [44] para el vuelo de un UAV a 4 m sobre una zona boscosa y comunicándose con tecnología UWB. En [44] se presentan dos escenarios con diferentes densidades de árboles obstaculizando la señal, por lo que en esta simulación se utiliza el valor de $\sigma_{sh} = 4.3$ dB para los escenarios de arbustos ligeros y bosque ligero por la baja densidad de árboles. Por otro lado, se utiliza el valor de $\sigma_{sh} = 4.8$ dB para los escenarios de bosque medio y bosque denso por su alta densidad de árboles.

Escenario	n	σ_r	Factor K
Arbusto ligero	2.2	3.1	10.5
Bosque ligero	2.4	2.4	10.4
Bosque medio	2.8	3.6	13.7
Bosque denso	4.1	2.7	12.9

Tabla 3.3: Parámetros para caracterizar el fenómeno de trayectorias múltiples en comunicaciones de UWB.

Con estos parámetros se busca determinar la probabilidad de conexión entre el UAV y las anclas al simular una misión de exploración dentro de los escenarios mencionados. Cabe mencionar que es posible la realización de misiones con UAVs dentro de áreas con un alto nivel de densidad de obstáculos como el caso del bosque denso gracias al uso de protecciones en forma de jaulas con la finalidad de evitar fuertes daños al vehículo dadas las altas posibilidades de colisión con los objetos [45], [46].

3.3.1.2. Resultados de simulación

Utilizando los parámetros presentados en las Tablas 3.1 y 3.3 es posible simular los posibles valores de potencia recibida en los cuatro ambientes de interés. En la Figura 3.5 se ejemplifica la potencia con la que llega la señal a una ancla en los ambientes de arbustos ligeros y bosque denso con el fin de contrastar de manera evidente la diferencia entre los ambientes con menor y mayor densidad de obstáculos. Teniendo como referencia la sensibilidad de -92 dBm, es posible observar que para el caso de arbustos ligeros la mayor parte de los valores simulados de potencia recibida se encuentran por encima del valor de referencia al menos para los primeros 13 m de alcance y oscilando entre dicho valor a lo largo de los 30 m. Por otro lado, en el escenario de bosque denso los valores de potencia recibida solo quedan por encima del valor de referencia al rededor de los primeros 6 m.

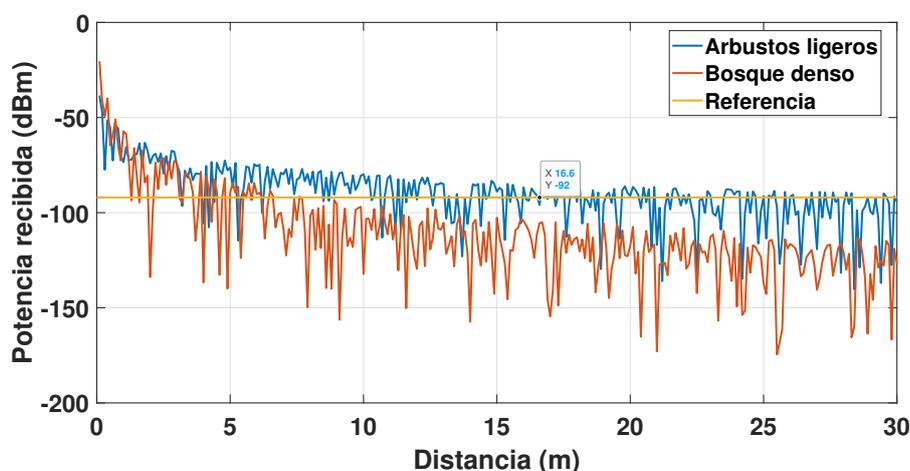


Figura 3.5: Potencia recibida para ambientes de arbustos ligeros y bosque denso.

Con esto queda claro que mientras mayor es la densidad de los obstáculos menor es el alcance de la señal, por lo que se requerirá un mayor número de anclas para cubrir la zona donde el UAV realiza su vuelo. A continuación se presentan los resultados de 10,000 corridas de simulación para conocer la probabilidad de conexión con al menos 4 anclas con propósitos de posicionamiento con diferentes niveles de macro-diversidad. Por lo tanto, como criterio de conectividad se considerará el tiempo de conexión entre el UAV y al menos cuatro de las anclas cuyas potencias recibidas sean mayores al valor de referencia de los módulos (-92 dBm), esto durante un tiempo total de vuelo de 250 s.

En la Figura 3.6 se muestran los resultados obtenidos para el ambiente de arbustos ligeros. Es posible observar que al desplegar la configuración de referencia ($N = 16$) se tiene un 99 % de probabilidad de conectarse a lo más durante 147 s. En contraste, para un arreglo de $N = 25$ se logra una conexión hasta 238 s para la misma probabilidad, obteniendo así un mejor desempeño por macro-diversidad del 60 %. Por lo tanto, para un ambiente de arbustos ligeros que contiene la mínima densidad de obstáculos entre los ambientes considerados en esta simulación se requiere máximo una separación entre anclas de 15 m.

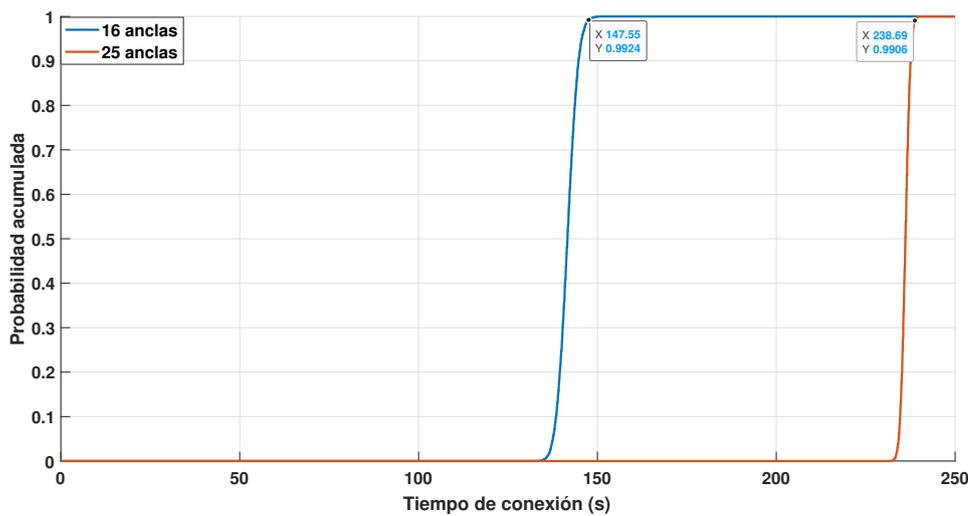


Figura 3.6: CDF para diferentes niveles de macro-diversidad en ambientes de arbustos ligeros.

Por otro lado, para el caso de ambientes con características de bosque ligero se puede observar en la Figura 3.7 que para una probabilidad del 99 % se tiene un tiempo de conexión de 84 s para una configuración de $N = 16$ y de 218 s para $N = 25$ con una mejora por macro-diversidad del 159 %. Comparado con el ambiente de arbustos ligeros la probabilidad de conexión decae considerablemente para el caso de la configuración de referencia.

Para el caso de ambientes de bosque medio, los resultados se pueden consultar en la Figura 3.8 donde se observa que la configuración de referencia tuvo un tiempo de conexión de 0 s, es decir, no es posible conectar el UAV con al menos 4 anclas en ningún momento distribuyendo solo 16 anclas. También es posible observar que para $N = 25$ se cuenta con un 99 % de probabilidad de conectarse por un tiempo limitado de 7 s mientras que para las configuraciones de $N = 49$ y $N = 121$ se tiene la misma probabilidad de conexión para los tiempos de 98 s y 246 s respectivamente. Se puede considerar que para ambientes de bosque medio se requiere que la separación entre anclas no sea mayor a 6 m.

Finalmente, los resultados para ambientes de bosque denso se presentan en la Figura 3.9 donde a partir de las CDF para $N = 169$ y $N = 441$ con una probabilidad del 99.9 % para un tiempo de conexión del 56 s y 244 s respectivamente. Por lo tanto, para un ambiente de bosque denso se requiere de una distancia entre anclas de 3 m.

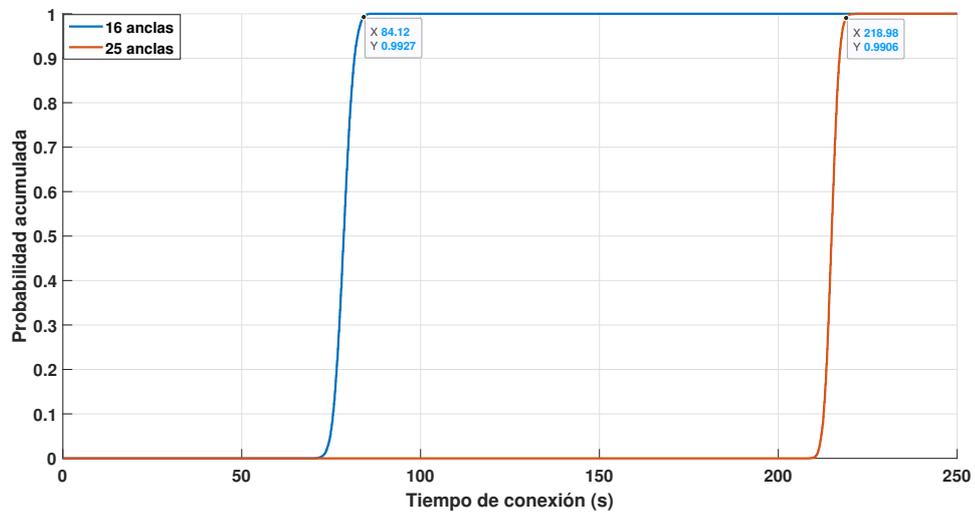


Figura 3.7: CDF para diferentes niveles de macro-diversidad en ambientes de bosque ligero.

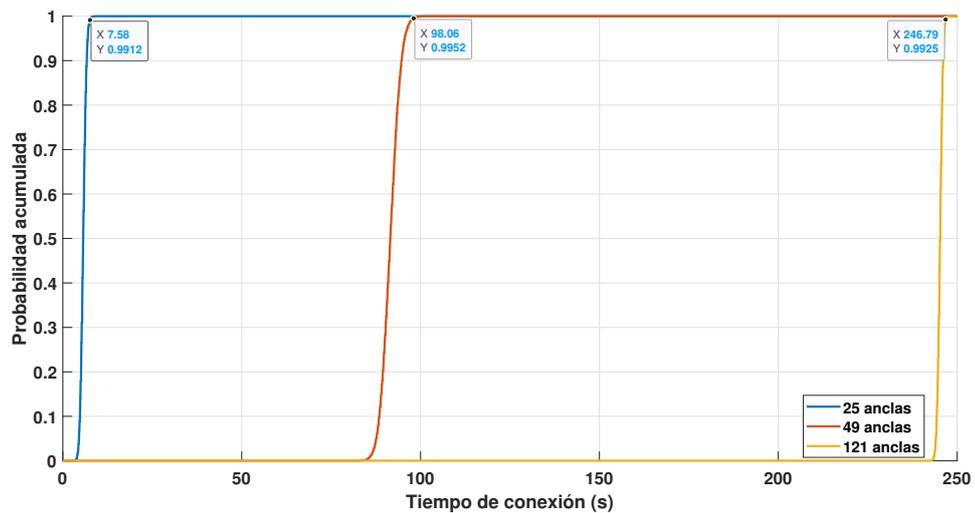


Figura 3.8: CDF para diferentes niveles de macro-diversidad en ambientes de bosque medio.

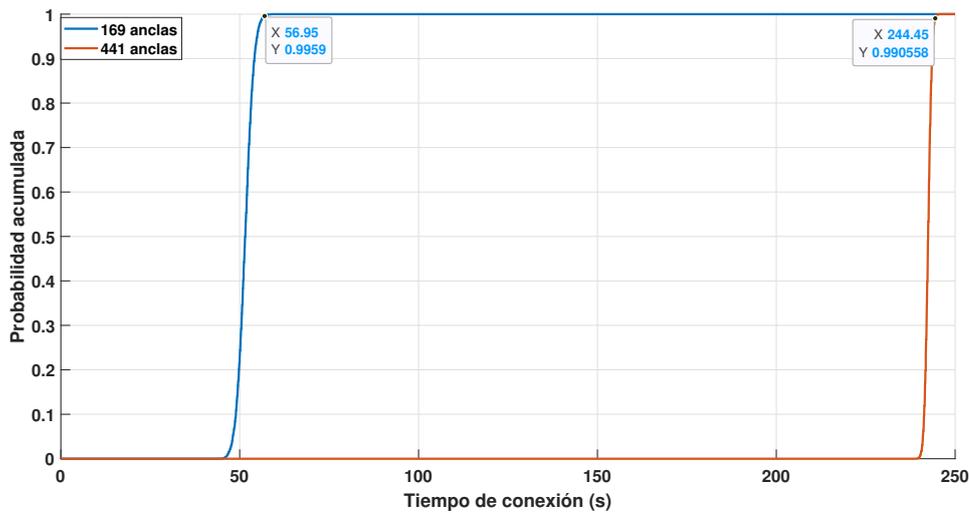


Figura 3.9: CDF para diferentes niveles de macro-diversidad en ambientes de bosque denso.

A partir de los resultados de simulación presentados en este capítulo es posible concluir que para ambientes con múltiples obstáculos como los urbanos y suburbanos los RTLS actuales no poseen la eficiencia necesaria para aplicaciones autónomas con UAVs ya que como se puede apreciar para un área de 30×30 m no resulta viable la instalación de 121 anclas para ambientes de bosque medio o la enorme cantidad de 441 anclas para bosque denso. Además, como se vio en el Capítulo 2, para obtener una estimación precisa de la posición es recomendable contar con sistemas sobredeterminados lo que implica un mayor número de anclas que proporcionen redundancia al sistema. Por tal motivo, en los próximos capítulos de este trabajo de tesis se busca contrarrestar estas problemáticas. Por un lado, se busca proponer una estrategia con la que se pueda realizar el posicionamiento de un UAV en un entorno suburbano reduciendo el número de anclas instaladas en dicha zona y también se propondrá un algoritmo con el que se pueda estimar con precisión la posición incluso si no se cuenta con sistemas sobredeterminados.

Vuelo en formación de UAVs

Como se ha estudiado en los capítulos anteriores, el principal problema en la localización de UAVs utilizando los métodos de radiofrecuencia en ambientes con múltiples obstáculos se encuentra en el corto alcance y en el gran número de anclas requeridas para garantizar el vuelo de un UAV dentro un área en específico. Sin embargo, este trabajo busca minimizar el número de anclas requeridas para la navegación de UAVs por ello se buscará compensar utilizando un mayor número de vehículos los cuales deberán volar de forma conjunta dentro de la misma área.

Por este motivo en este capítulo se presentan los conceptos básicos de consenso en sistemas multiagentes así como la estrategia utilizada en este trabajo para garantizar el vuelo en formación con múltiples UAVs.

4.1. Teoría de grafos y consenso en sistemas multiagentes

El desplazamiento de un grupo en forma sincronizada es un fenómeno presente incluso dentro de la naturaleza, por ejemplo, las parvadas de aves, un banco de peces o incluso algunas manadas de animales son capaces de moverse en grupo de forma sincronizada a pesar de que cada individuo posea su propia psicología y reacciones de movimiento con el fin de alcanzar su objetivo ya sea migrar, buscar comida o evadir depredadores u obstáculos. La principal ventaja de moverse en grupo de forma sincronizada a pesar de ser individuos independientes es que es posible lograr lo que por separado no podrían o realizar tareas específicas de forma más eficiente.

Dentro de un sistema multiagente los movimientos de cada individuo son el resultado de mantenerse cerca del grupo pero evitando colisionar con los agentes vecinos. Para lograrlo existen 3 reglas principales que deben seguir [47], estas reglas son conocidas como “Las reglas de Reynolds” y son descritas como:

- Evasión de colisiones: cada agente debe evitar colisionar con los agentes vecinos.
- Acoplamiento de la velocidad: cada agente debe acoplarse a la velocidad y dirección de los agentes vecinos.
- Centrado de la parvada: cada agente debe permanecer cerca de sus vecinos.

Para aplicar estas reglas es necesario que los agentes conozcan la posición de los agentes vecinos, por ello se requiere de una red de comunicaciones en el sistema multiagente. Esta red de comunicación puede ser modelada por medio de una topología de grafo donde cada nodo representa un agente y las flechas el flujo de información.

En la Figura 4.1 se muestran diferentes topologías de comunicación con 6 agentes, donde para el caso de las topologías no direccionadas se puede considerar que la comunicación es bidireccional. En el presente trabajo de tesis se implementó una topología completa (ver Figura 4.1e) debido a que cada vehículo y la información que comparte tiene la misma importancia. Sin embargo, vale la pena mencionar que mientras mayor es el número de agentes, mayor será el tráfico de información, pero ya que en este trabajo de tesis se están considerando el uso de solo tres UAVs en una topología completa, no es necesario preocuparse por pérdidas de información [47].

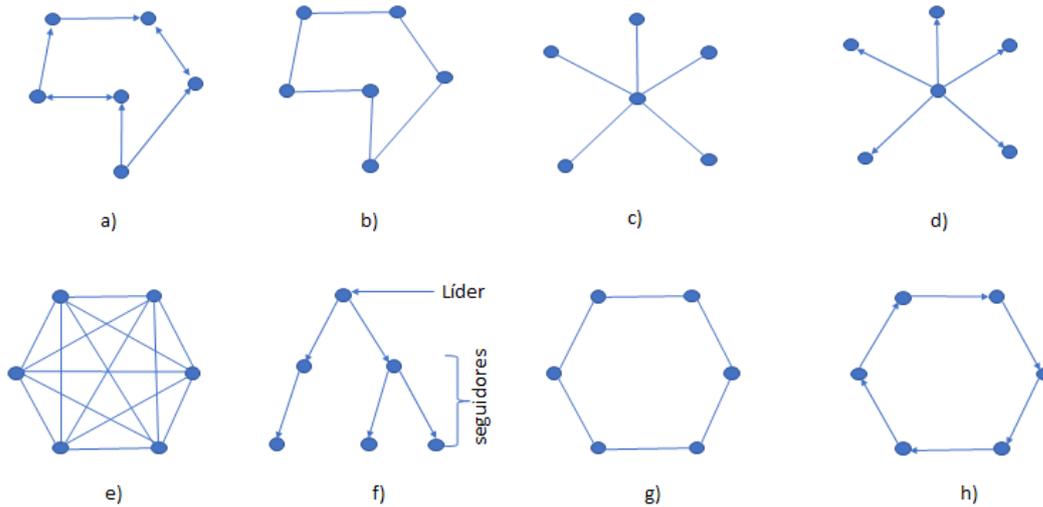


Figura 4.1: Diferentes tipos de grafos: a) direccionado, b) no direccionado, c) estrella no direccionada, d) estrella direccionada, e) completo, f) árbol direccionado, g) ciclo no direccionado, h) ciclo direccionado

Un grafo puede representarse como $G = (V, E)$ donde $V = \{v_1, \dots, v_N\}$ es el conjunto de N nodos o vértices. Mientras que E es el conjunto con las flechas que unen a los nodos y están denotadas por (v_i, v_j) mostrando el flujo de información que va desde el nodo v_i al nodo v_j .

Para implementar las reglas de Reynolds es importante primero definir $(p_i(t), q_i(t))$ como la posición del nodo i en el plano XY y en el tiempo t . Ya que los agentes buscan evitar las colisiones, se define un círculo de colisión con radio ρ_c el cual se busca mantener libre de otros agentes por lo que la vecindad de colisión para el agente i puede ser definida como $N_i^c = \{j : r_{ij} \leq \rho_c\}$ donde la distancia entre los agentes i y j es

$$r_{ij} = |x_j - x_i| = \sqrt{(p_j - p_i)^2 + (q_j - q_i)^2} \quad (4.1)$$

Por otro lado, se define un círculo de interacción $\rho > \rho_c$ dado por $N_i = \{j : r_{ij} \leq \rho\}$.

Los movimientos individuales de cada agente pueden ser simplificados con la siguiente dinámica

$$\dot{x}_i = u_i \quad (4.2)$$

con estado $x_i = [p_i \ q_i]^T$ y una entrada de control de velocidad $u_i = [u_{pi} \ u_{qi}]$.

Con el fin de lograr que el agente i evite la colisión con otros agentes, se puede utilizar la siguiente ley de control

$$u_i = - \sum_{j \in N_i^c} c_{ij} (x_j - x_i) \quad (4.3)$$

donde la constante c_{ij} es la ganancia de evasión de colisión, con lo que el agente i buscará alejarse de los agentes que se encuentren dentro del círculo de colisión ρ_c .

De igual manera, para lograr mantenerse cerca de la parvada es posible utilizar una ley de control similar considerando a los agentes que se encuentren en el conjunto N_i exceptuando aquellos que se encuentran dentro del conjunto N_i^c

$$u_i = \sum_{j \in N_i \setminus N_i^c} a_{ij} (x_j - x_i) \quad (4.4)$$

donde la constante a_{ij} es la ganancia de centrado en la parvada, con la intención de que el agente i se mueva en dirección de los agentes que se encuentren dentro del círculo de interacción ρ pero fuera del círculo de colisión ρ_c .

En la Figura 4.2 se ejemplifica una representación de la interacción entre los agentes para lograr un consenso. Se puede observar que los agentes v_4 y v_5 que se encuentran dentro de ρ_c se alejarán para evitar una colisión con el agente v_1 , mientras que los agentes v_2 y v_3 que se encuentran fuera de ρ_c pero dentro de ρ buscaran acercarse a v_1 .

Cabe destacar que el control de velocidad resulta de la suma de las Ecuaciones (4.3) y (4.4). Además, las velocidades resultantes pueden escribirse por sus componentes como se muestran en las siguientes ecuaciones

$$\dot{p}_i = u_{pi} = \sum_{j \in N_i \setminus N_i^c} a_{ij} (p_j - p_i) - \sum_{j \in N_i^c} c_{ij} (p_j - p_i) \quad (4.5)$$

$$\dot{q}_i = u_{qi} = \sum_{j \in N_i \setminus N_i^c} a_{ij} (q_j - q_i) - \sum_{j \in N_i^c} c_{ij} (q_j - q_i) \quad (4.6)$$

La relación entre las constantes c_{ij} y a_{ij} y las circunferencias ρ y ρ_c determina los comportamientos de cada agente dentro de un sistema multiagente.

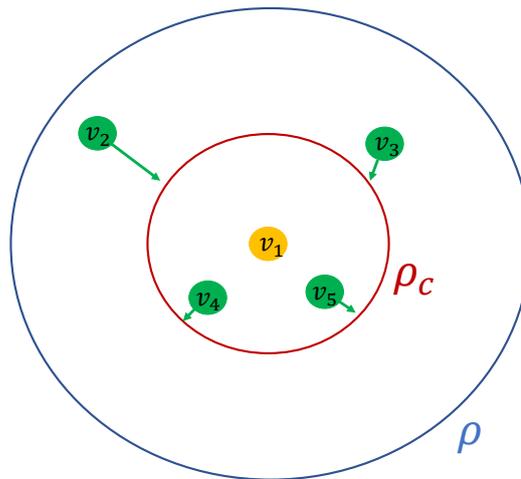


Figura 4.2: Ejemplo del consenso realizado por cinco agentes.

4.2. Vuelo en formación

Una vez establecidos los principios básicos del consenso en sistemas multiagentes para mantener una distancia apropiada entre agentes evitando la colisión, ahora, es importante establecer una estrategia para el control de una formación durante el vuelo de los UAVs.

Similar a la forma en que una parvada de aves vuelan en una formación “V” para lograr una mayor eficiencia durante el vuelo, los UAVs también pueden aprovechar las ventajas de este tipo de estrategias, un ejemplo de esto es que a partir del control de una formación es posible controlar múltiples UAVs a partir de uno solo [48].

Generalmente las estrategias para el control de formación de múltiples robots móviles pueden ser clasificadas en tres principales grupos: a) líder seguidor, b) conductual y c) estructura virtual [48]. Cada una de estas estrategias tienen sus propias ventajas y desventajas dependiendo del objetivo a lograr por los robots móviles así como del ambiente en el que se desplazan.

Líder seguidor: unos agentes son considerados como líderes mientras otros como seguidores por lo que el control de formación se traduce en que el líder sigue una trayectoria predefinida y los seguidores siguen las coordenadas del líder. Sin embargo, el líder no posee información de los seguidores así que si un seguidor falla entonces el líder se moverá según su trayectoria y la formación no podrá ser mantenida.

Conductal: se diseñan distintas tareas para cada agente tal como el seguimiento de trayectoria, evasión de obstáculos o mantener la formación de tal forma que el agente responda a partir de una suma de pesos de cada una de las conductas posibles.

Estructura virtual: la formación es tratada como un cuerpo rígido por lo que la posición deseada de cada agente se determina como partículas embebidas de la estructura virtual.

Debido a que en este trabajo se centra en la tarea de posicionamiento y a que la información proporcionada por cada UAV es igual de importante como para asignar sólo un líder de formación, a partir de este momento se desarrollará a mayor detalle la estrategia de estructura virtual ya que será implementada en la propuesta de esta tesis.

4.3. Estructura virtual

Un cuerpo rígido está compuesto de un sistema de partículas con restricciones holonómicas, es decir, que son integrables, tal que: $|r_i - r_j| = d_{ij} = const$ donde r_i y r_j son las posiciones de las partículas [49]. Las partículas pueden moverse en el espacio conservando sus restricciones geométricas respecto a un marco de referencia. Una estructura virtual busca emular los movimientos de un cuerpo rígido a pesar de no contar con sus restricciones físicas, por lo tanto, se puede definir la estructura virtual de la siguiente manera:

Estructura virtual: *Una estructura virtual es un conjunto de elementos (por ejemplo, robots) que mantienen una restricción geométrica rígida dentro de un mismo marco de referencia [50].*

Los movimientos generados en formación por parte de los robots móviles deben de satisfacer dos objetivos principales: (1) realizar un movimiento en una dirección dada y (2) mantener la relación geométrica entre los robots móviles.

La idea principal en la estrategia por estructura virtual es que los robots se muevan con la finalidad de permanecer en los vértices correspondientes de la estructura virtual y a su vez la estructura virtual se mueva acoplándose a los movimientos de los robots. El algoritmo utilizado para realizar el desplazamiento en formación es el siguiente y se representa por la Figura 4.3.

Algoritmo del desplazamiento en formación

- (1) Alinear la estructura virtual con la posición actual de los robots móviles.
- (2) Mover la estructura virtual con un desplazamiento lineal (δx) y/o un desplazamiento angular ($\delta\theta$).
- (3) Generar las trayectorias para cada robot con el fin de acoplarse a la estructura virtual y realizar el seguimiento de trayectoria ajustando las velocidades.
- (4) Regresa al paso 1.

En el primer paso la estructura virtual es alineada con los robots para después ser empujada en la dirección deseada en el paso 2. Dentro de los pasos 3 y 4 los robots móviles tratan de mantener la formación mientras se desplazan en la trayectoria generada por la estructura virtual por lo que se consideran como puntos de un cuerpo rígido.

En la Figura 4.4 se muestra una representación del seguimiento de trayectoria en el cual la estructura virtual comienza a moverse y los robots gradualmente logran posicionarse dentro de la formación durante todo el recorrido. Por otro lado, como se puede observar en la Figura 4.5 en el caso de que un robot sea incapaz de seguir la trayectoria, la formación logra reconfigurarse en la dirección deseada aún si no es capaz de moverse al destino dado. En el caso de la estrategia de

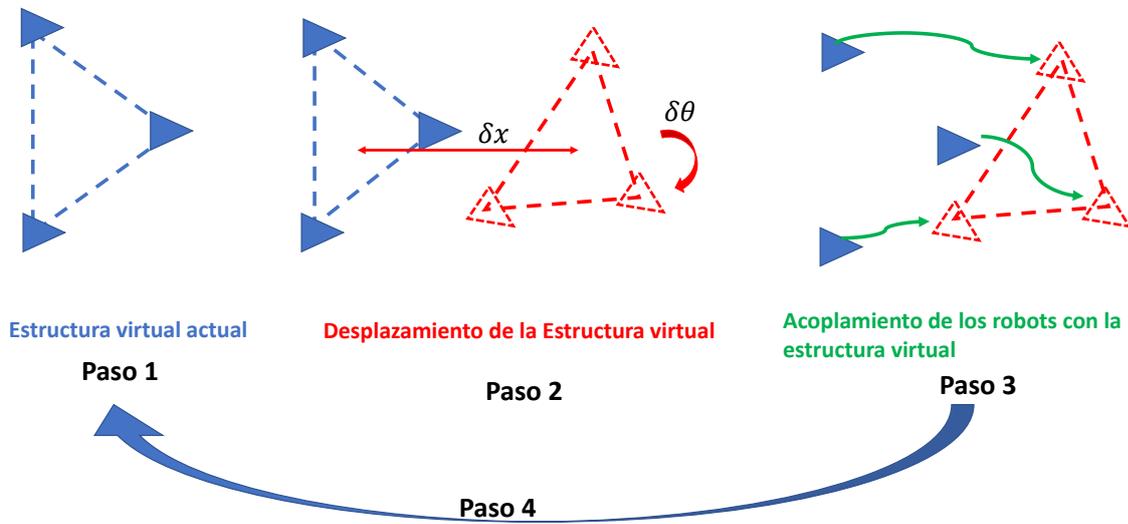


Figura 4.3: Representación gráfica del algoritmo para desplazarse en formación usando una estructura virtual.

líder-seguidor si un robot seguidor falla en el seguimiento de trayectoria suele ser dejado atrás y la formación se rompe, a pesar de que es posible que el robot no se encuentre completamente averiado, probablemente es incapaz de seguir la velocidad del líder ó solo haya sufrido una falla momentánea. Cuando la misión requiere mantener la formación incluso bajos estas condiciones la estrategia de estructura virtual permite hacerlo sin necesidad de implementar complicadas estrategias de control.

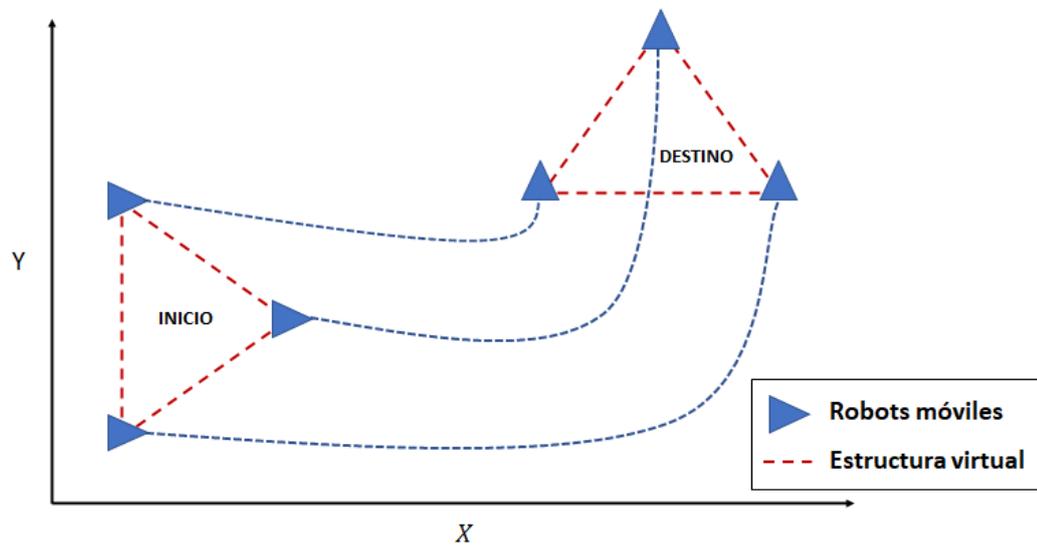


Figura 4.4: Desplazamiento de tres robots móviles siguiendo la formación dada por la estructura virtual.

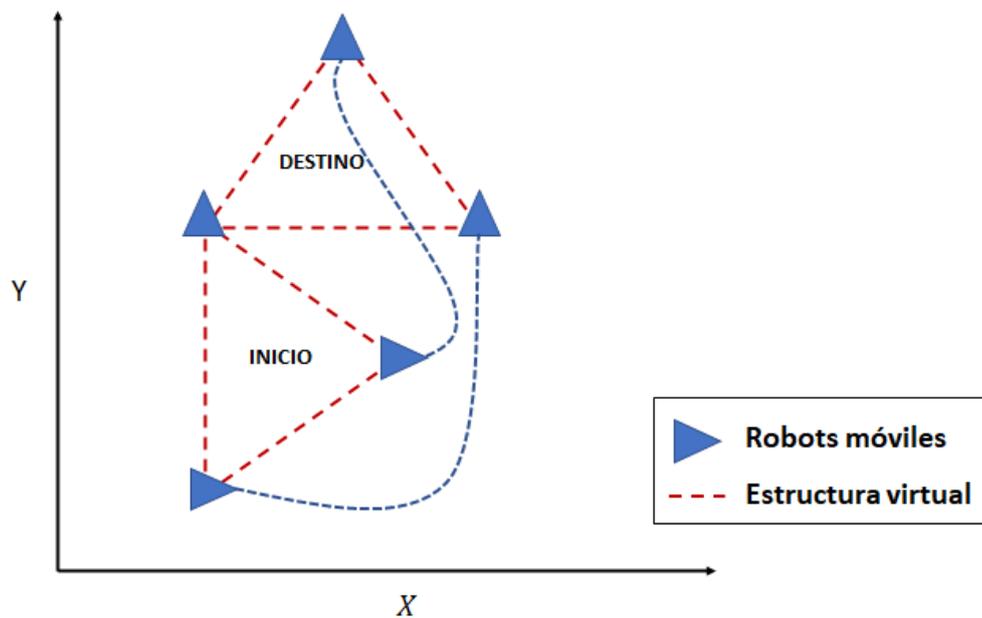


Figura 4.5: Desplazamiento de tres robots móviles cuando uno de ellos sufre una avería según el movimiento de la estructura virtual.

Estrategias propuestas y análisis por simulación

En los capítulos anteriores se plantea el problema a resolver en esta tesis así como los temas y los conceptos básicos necesarios para dar solución a dicho problema. En este capítulo se propone una estrategia con la cual se busca estimar la posición de múltiples UAVs dentro de zonas suburbanas y desconocidas.

5.1. Algoritmo RA-GN

Primeramente se propone un método con el cual se pueda estimar la posición de cada UAV de manera confiable utilizando la menor cantidad de anclas posibles. En el Capítulo 2 se presentaron cuatro distintos métodos de posicionamiento y se compararon en términos de precisión, pero es importante mencionar que los métodos presentados hasta el momento requieren de un sistema sobre-determinado, es decir, que haya un mayor número de anclas que el mínimo requerido debido a que al contar con mayor información se puede lograr una mejor estimación. Sin embargo, dentro de los ambientes de interés de este trabajo es difícil contar con la redundancia recomendada, esto debido a la atenuación de la señal por los múltiples obstáculos en el ambiente, ya que mientras mayor es la densidad de los objetos, mayor es el número de anclas que deben ser instaladas, es decir, que se debe contar con un mayor nivel de macro-diversidad como se mostró en el Capítulo 3.

Con el fin de lograr la estimación de posición con un número mínimo de anclas posibles, a continuación se propone un algoritmo que hace uso del método de ejes radicales y el método de Gauss-Newton, los cuales ya fueron explicados a detalle en el Capítulo 2. El método de ejes radicales tiene como ventaja sobre los otros métodos la capacidad de siempre generar una solución incluso si el sistema de ecuaciones generado por el problema de localización no tiene una única solución. Por otro lado, el método de Gauss-Newton es capaz de minimizar los errores a partir de una función de costo de forma iterativa aunque depende en gran medida de los valores iniciales.

El algoritmo de localización propuesto durante el desarrollo del presente proyecto de

doctorado y llamado RA-GN utiliza como primera aproximación la solución generada por el método de ejes radicales, la cual será utilizada posteriormente como valor inicial por el método de Gauss-Newton para entonces generar la posición donde los errores respecto a cada ancla son mínimos, explotando así las ventajas de cada método.

Es importante mencionar que cuando el sistema de ecuaciones generado por el problema de localización tiene múltiples soluciones, el método de Gauss-Newton converge a la solución más cercana a los valores iniciales, por lo que al utilizar la estimación generada por el método de ejes radicales como valor inicial mejora en gran medida la probabilidad de que el método de Gauss-Newton converja a la posición real. Sin embargo, si no existe solución para el sistema de ecuaciones, el método de Gauss-Newton puede resultar en una indeterminación.

Cuando las distancias medidas entre las anclas y el nodo a estimar son más grandes a las reales, el sistema de ecuaciones tendrá múltiples soluciones. Considerando que los módulos de UWB utilizan la técnica TWR (véase la Sección 1.4) para medir la distancia entre las anclas y el nodo a estimar, generalmente estas mediciones son más grandes que las distancias reales debido al retardo en el envío de los mensajes se podría esperar que siempre existan múltiples soluciones para el sistema de ecuaciones. Sin embargo, actualmente los fabricantes de los sistemas de localización tienen esto en cuenta por lo que han desarrollado estrategias para mejorar la precisión. Entre estas estrategias es común calibrar los módulos de UWB para compensar el retardo de los componentes electrónicos y el fenómeno de trayectorias múltiples, por lo que las mediciones suelen ser más precisas en ambientes con obstáculos como se muestra en el Capítulo 6. Sin embargo, aunque estas mejoras pueden aumentar la precisión en sistemas con redundancia, como consecuencia también aumenta la probabilidad de que el sistema de ecuaciones no tenga solución. Por lo tanto, el algoritmo RA-GN debe encontrar la mejor posición posible sin caer en un valor indefinido y esto se logra monitoreando el determinante Jacobiano.

De acuerdo al teorema de la función inversa [51], la matriz Jacobiana de una función es invertible si y solo si el determinante Jacobiano J_{\det} no es cero.

$$\mathbf{J} = \frac{1}{J_{\det}} \begin{pmatrix} \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Si $J_{\det} = 0$ la matriz Jacobiana no es invertible, entonces, el sistema de ecuaciones no tiene solución y el resultado del método de Gauss-Newton puede resultar en una indeterminación. Para evitar este resultado, el determinante Jacobiano será calculado en cada iteración del método de Gauss-Newton y cuando este sea cero el algoritmo terminará y se tomará como solución la posición de la última iteración. En caso contrario, la estimación se actualizará iterativamente hasta que el RMSE alcance la tolerancia deseada ϵ ó en su defecto se supere un número máximo de iteraciones M el cual se recomienda no sea mayor a 10 ya que al partir de una estimación inicial dada por el método de ejes radicales no se requiere de un gran número de iteraciones para llegar a la mejor solución posible.

Por lo tanto, el algoritmo RA-GN está dado por los siguientes pasos:

Algoritmo RA-GN

1. Se generan todas las posibles ecuaciones de ejes radicales L_{ij} combinando los pares de anclas.
2. Se obtiene la matriz $\mathbf{A} = [a_{ij}b_{ij}]$ a partir de las ecuaciones de ejes radicales en la forma de (2.27).
3. Se estima la posición (\hat{x}, \hat{y}) usando la pseudoinversa de \mathbf{A}^+ .
4. Se establecen los valores iniciales de (\hat{x}, \hat{y}) , tolerancia $\epsilon > 0$ y $k_0 = 0$ para el método de Gauss-Newton.
5. Se calcula el determinante Jacobiano J_{\det}
6. **if** $J_{\det} = 0$ **then**
7. **End**
8. **else**
9. Se calcula la matriz Jacobiana \mathbf{J}_k y el gradiente \mathbf{g}_k
10. **if** RMSE $< \epsilon$ **then**
11. **End**
12. **else**
13. Se calcula \mathbf{s}_k con la Ecuación (2.17)
14. Actualiza p_k con la Ecuación (2.11).
15. Se establece $k = k + 1$
16. **if** $k > M$ **then**
17. **End**
18. **else**
19. regresa al paso 5

Con el fin de comprobar la ventaja de este algoritmo sobre los otros métodos por separado se realizó una simulación donde se despliegan un total de 3 anclas y un UAV en posiciones aleatorias dentro de un área de 30×30 m como se muestra en la Figura 5.1. Posteriormente, se realiza la estimación de la posición del UAV por medio del algoritmo RA-GN, el método de ejes radicales y el método Gauss-Newton. Es importante mencionar que se ha agregado una variable aleatoria con distribución Gaussiana y una desviación estándar de $\sigma = 0.5$ m a la distancia estimada entre cada ancla y el UAV con la finalidad de representar el error generado por el efecto de trayectorias múltiples (véase Capítulo 3) debido a los obstáculos dentro del ambiente [52].

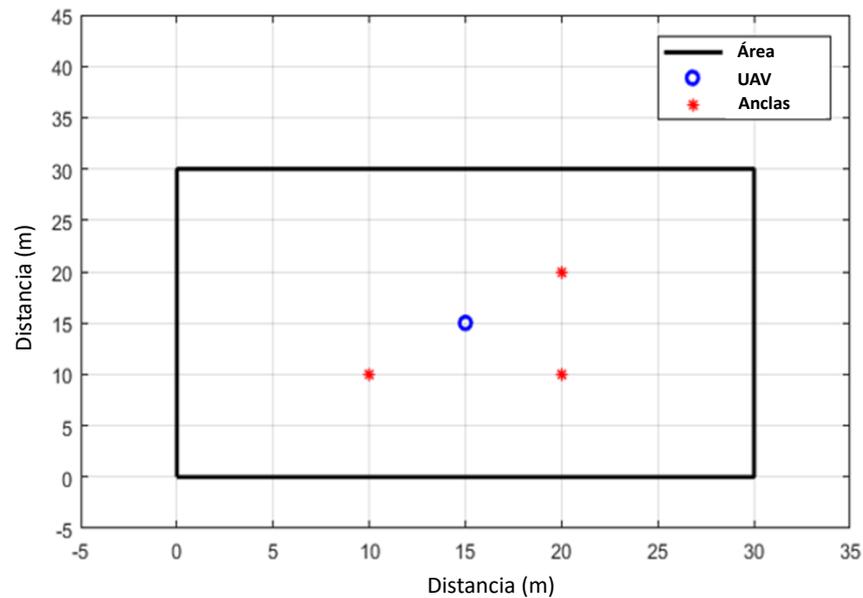


Figura 5.1: Área de simulación donde las anclas y el UAV son desplegados.

Ya que en esta comparación tiene gran importancia el valor inicial usado en el método de Gauss-Newton, se considerarán también los casos donde el valor inicial está dado por el origen (0,0) y el centro del área (15,15), los cuales estarán etiquetados por GN0 y GN15 respectivamente. Por otro lado, se usa una tolerancia de $\epsilon = 0.001$ m y un máximo de 20 iteraciones en cada método (GN0 y GN15).

Los resultados obtenidos después de 10,000 estimaciones se muestran en la Figura 5.2 utilizando la CDF del RMSE obtenido por cada método. En estos resultados es posible observar que, para las condiciones descritas con solo 3 anclas, el algoritmo RA-GN tiene una probabilidad del 90 % de obtener un RMSE menor a 21 cm mejora en gran medida la precisión de la estimación obtenida por los métodos por separado ya que para el caso del método de Ejes Radicales se tiene un RMSE de 1.55 m con una probabilidad del 90 %, y de igual manera, para el caso de GN0 y GN15 se tiene que los valores de RMSE son de 1.88 m y 35 cm, respectivamente para una probabilidad aproximada de 90 %. Dada la diferencia en los resultados obtenidos por esta simulación se puede comprobar la importancia que tienen los valores iniciales en la estimación de posición utilizando el método de Gauss-Newton, por lo que se demuestra que al utilizar la estimación del método de Ejes Radicales como estimación inicial se puede mejorar la precisión del método de Gauss-Newton.

Además, con la finalidad de analizar cómo se ve afectado el comportamiento del algoritmo RA-GN para sistemas redundantes, se utilizó la misma área de simulación mostrada en la Figura 5.1 pero utilizando un diferente número de anclas, por lo que se analizó para 3, 4, 6 y 8 anclas. En la Figura 5.3 es posible observar que para una probabilidad del 90 % se tiene que la estimación con solo tres anclas posee el menor valor de RMSE de 21.2 cm comparado con la estimación obtenida por 8 anclas cuyo valor de RMSE es de 26.3 cm para la misma probabilidad de la 90 %. Por otro lado, si se observa la probabilidad del 99 % los resultados

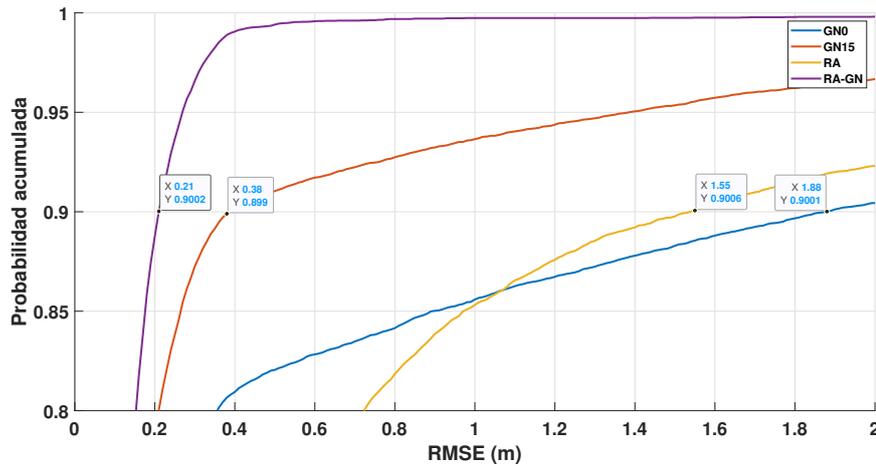


Figura 5.2: CDF del RMSE obtenido para los métodos comparados utilizando únicamente 3 anclas.

cambian por completo siendo que la estimación de 8 anclas tiene el mejor desempeño con un RMSE de 33.3 cm y la estimación con 3 anclas el peor RMSE de 38.5 cm, lo que puede suponer una mejor convergencia al 100 % al tener un mayor número de anclas. Sin embargo, es importante notar que la diferencia es de aproximadamente 5 cm para cada probabilidad analizada, lo cual resulta ser una diferencia muy pequeña para el costo que implicaría el aumento de anclas para la estimación.

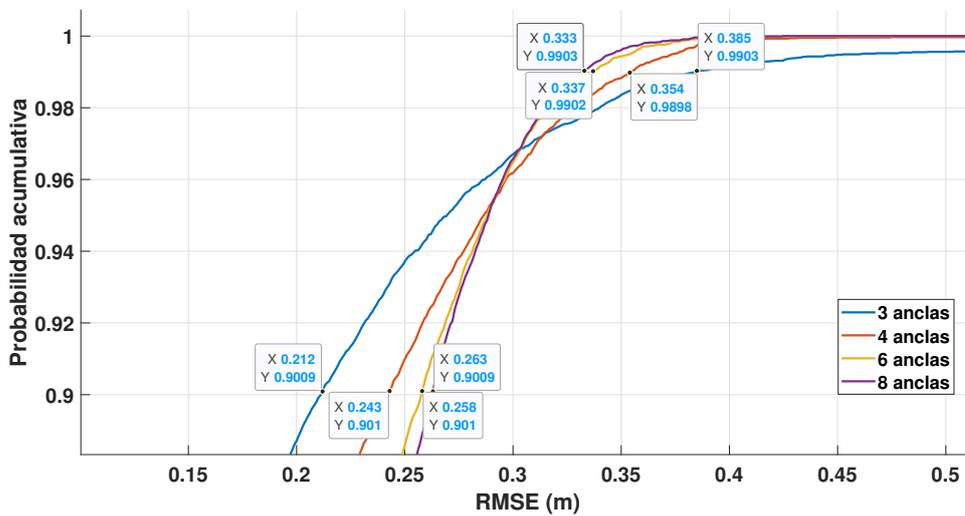


Figura 5.3: CDF del RMSE obtenido al evaluar el algoritmo RA-GN con distinto número de anclas.

Por otro lado, en la Figura 5.4 se puede observar cómo se reduce en gran medida la ganancia en precisión obtenida por el algoritmo RA-GN comparado con los otros métodos cuando se evalúa con sistemas redundantes. Ya que al utilizar un sistema redundante de 8 anclas los resultados muestran que la precisión de todos los métodos aumenta, se puede observar que la diferencia entre los RMSE obtenidos con una probabilidad del 90 % es de tan solo unos centímetros. Por lo que los beneficios del algoritmo propuesto se pueden ver con mayor

claridad para sistemas no redundantes.

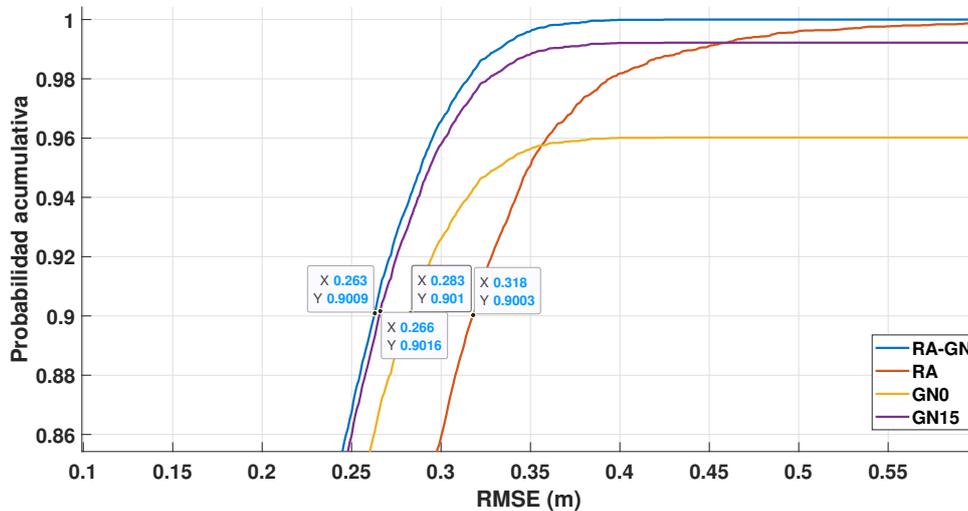


Figura 5.4: CDF del RMSE obtenido para los métodos comparados utilizando un sistema con redundancia de 8 anclas.

5.2. Estrategia de navegación

El objetivo de esta tesis es el de proponer una estrategia para la localización de UAVs durante la navegación de un ambiente desconocido cuando no es posible el uso del GPS, lo cual significa que no es posible la previa instalación de las anclas conociendo su posición como se suele hacer en el caso de localización en interiores. Por tal motivo, una posible solución es propuesta en este trabajo. Debido a que los escenarios donde UAVs navegan sin el uso de GPS se limita principalmente a escenarios tales como cuevas, túneles o ambientes urbanos y boscosos debido a la interferencia de los obstáculos presentes, para estos casos en específico se propone que los UAVs (mínimo 3) monitoreen la potencia de la señal recibida por las estaciones base (o anclas) y conforme procede la exploración y la señal se pierda, se agregarán nuevas anclas (3 anclas para cumplir con el propósito de posicionamiento) como se muestra en las Figuras 5.5 y 5.6. Basada en implementaciones de redes inalámbricas de sensores, esta propuesta busca aumentar el número de anclas conforme sean requeridas dentro del escenario a explorar.

Ya que las anclas serán liberadas desde el UAV hasta caer en el suelo, se considerará que las anclas serán posicionadas al nivel del suelo y que la distancia D_i entre el ancla i y el UAV, ilustrada en la Figura 5.7, se determina por la técnica TWR explicada en el Capítulo 1.

Si se considera que es posible conocer la altitud a la que vuelan los UAVs a través de sensores como el barómetro, ultrasónicos o sensores lidar, entonces, es posible delimitar el problema de localización al plano XY con la finalidad de reducir la mínima cantidad de anclas necesarias para la estimación. Entonces, es posible determinar la distancia en el plano XY

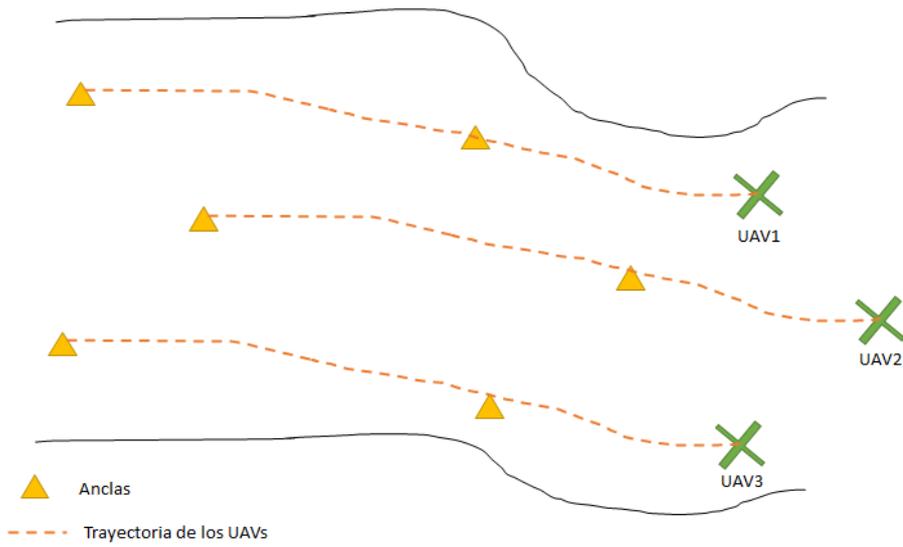


Figura 5.5: Propuesta de navegación de UAVs dentro de un escenario desconocido.

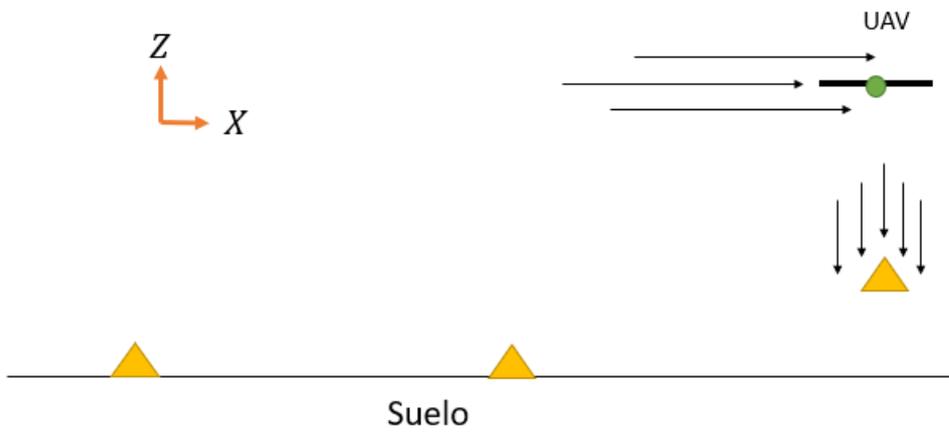


Figura 5.6: UAV liberando anclas mientras vuela.

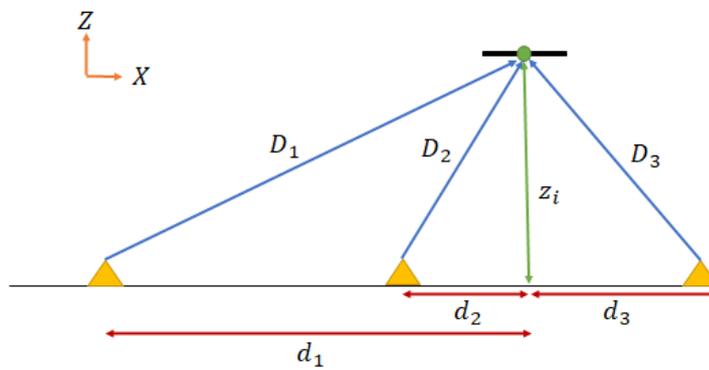


Figura 5.7: UAV liberando anclas mientras vuela.

simplemente usando el teorema de Pitágoras.

$$d_i = \sqrt{D_i^2 - z_i^2}; \quad (5.2)$$

5.3. Simulación de propuesta de navegación

En esta sección se explicará la plataforma de simulación en la cual se muestra la propuesta de navegación presentada en la sección anterior, además, debido a que en esta plataforma de simulación se hace uso de todos los conocimientos compilados en este trabajo de tesis, para facilitar la visualización del trabajo que se hace internamente, se dividirá en cuatro etapas como se muestra en la Figura 5.8.

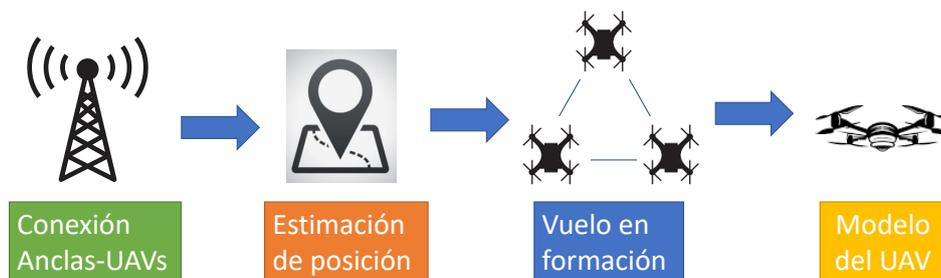


Figura 5.8: Etapas de la simulación.

- **Conexión Anclas-UAVs:** Se determina si existe conexión entre las anclas y los UAVs utilizando el modelo de propagación estudiado para ambientes con obstáculos considerando los fenómenos de ensombrecimiento y trayectorias múltiples explicados en la Sección 3.1. En caso de que no sea posible establecer la conexión de al menos tres anclas con los UAVs, se da la orden de liberar nuevas anclas en el sistema. En la Figura 5.9 se muestra el diagrama de bloques de esta etapa de simulación donde se determina la conexión entre las anclas y los UAVs. A partir de las posiciones reales de los UAVs y las anclas dentro del sistema, se calcula la distancia entre ellos. Usando este dato junto a las especificaciones de los módulos DWM1001 y los parámetros del ambiente, se simulaban las posibles potencias recibidas para determinar si existe conexión entre los UAVs y las anclas. Por último se seleccionan al menos 3 anclas que serán utilizadas para la estimación de posición o en su defecto se agregarán 3 nuevas anclas al sistema con el fin de ampliar el alcance de estimación. En la Figura 5.10 se muestran las variables consideradas en esta etapa de simulación, usando las especificaciones de los módulos DWM1001 así como los parámetros del ambiente simulado (n , σ_{sh} , σ_r y el factor K). Se determina la conexión de

cada ancla S_i cuya posición está dada por $(x_{s_i}, y_{s_i}, z_{s_i})$ con los UAVs y se eligen al menos tres de estas estaciones para usarse como anclas (A_1, A_2, A_3) en la estimación de la posición (con fines ilustrativos en la Figura 5.10 las estaciones S_2, S_3 y S_i son las que pudieron establecer conexión con el UAV y por lo tanto se toman como anclas A_1, A_2 y A_3 , respectivamente).

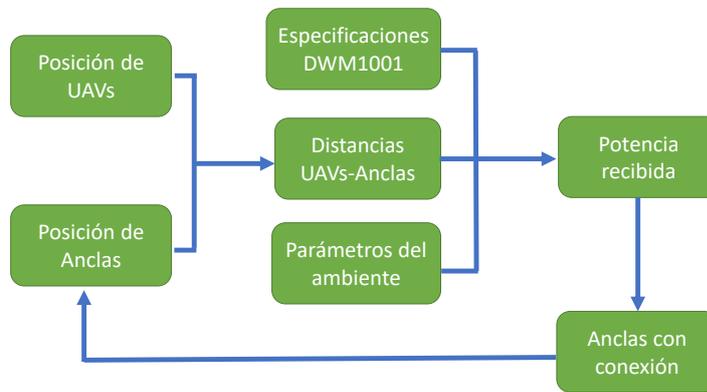


Figura 5.9: Diagrama de bloques para determinar la conexión entre anclas y UAVs.

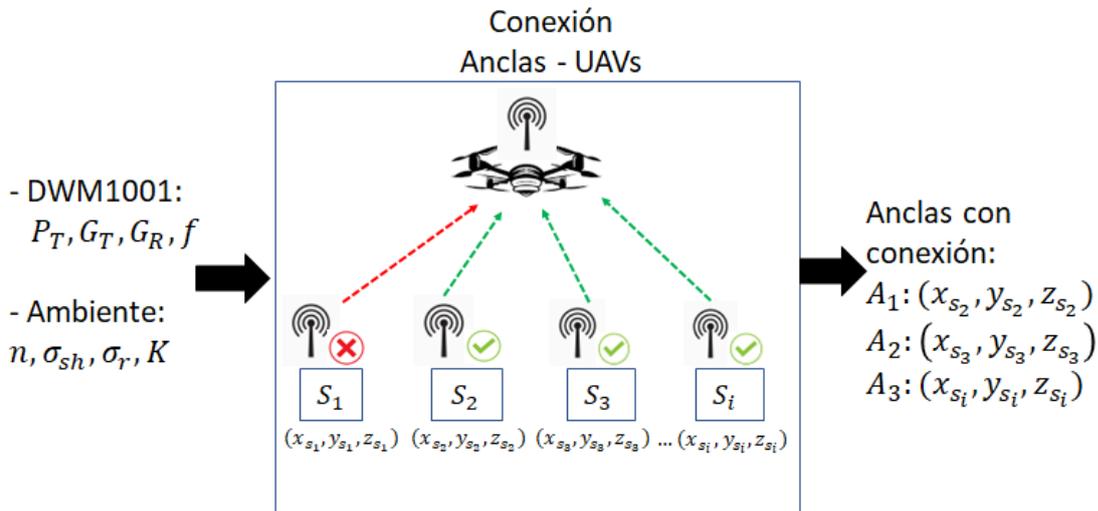


Figura 5.10: Variables utilizadas en la etapa de “Conexión Anclas-UAVs”.

- Estimación de la posición: se determina la posición de cada UAV utilizando el algoritmo RA-GN propuesto en este trabajo de tesis. En la Figura 5.11 se muestra el diagrama a bloques de la plataforma de simulación encargada de la estimación de posición para cada uno de los tres UAVs. Usando las distancias entre los UAVs y las anclas se obtienen las posibles mediciones de distancia dadas por los módulos DWM1001 agregando un error de forma aleatoria con distribución Gaussiana. Posteriormente se estima la posición de cada UAV utilizando de

algoritmo RA-GN. En la Figura 5.12 se observan las variables utilizadas en esta etapa, a partir de las anclas seleccionadas cuya conexión ha sido comprobada será posible obtener sus distancias hacia los UAVs (d_1 , d_2 y d_3) y así es posible estimar la posición (\hat{x} , \hat{y} , \hat{z}) de cada UAV.



Figura 5.11: Diagrama de bloques para la estimación de posición de los UAVs.

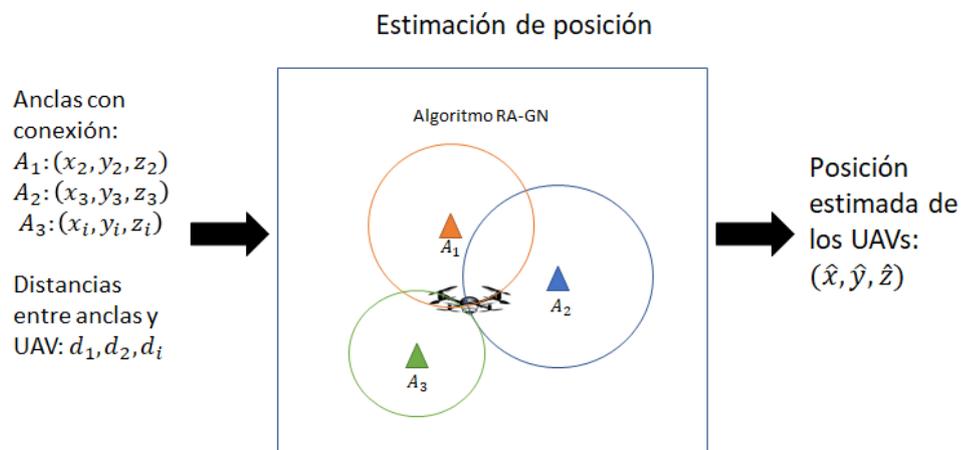


Figura 5.12: Variables utilizadas en la etapa de “Estimación de posición”.

- Vuelo en formación: En esta etapa se aplica la estrategia de estructura virtual para generar las trayectorias a seguir por cada UAV con la finalidad de conservar la formación mientras se realiza la navegación deseada. En la Figura 5.13 se muestra el diagrama a bloques utilizados en la plataforma de simulación para esta etapa. Por otro lado, en la Figura 5.14 se muestran las variables utilizadas en esta etapa de simulación. Usando las posiciones estimadas de los UAVs (\hat{x} , \hat{y} , \hat{z}) se determina la posición actual de la estructura virtual y con esta información se generan las trayectorias deseadas (x_d, y_d, z_d) a seguir para desplazarse conservando la formación.

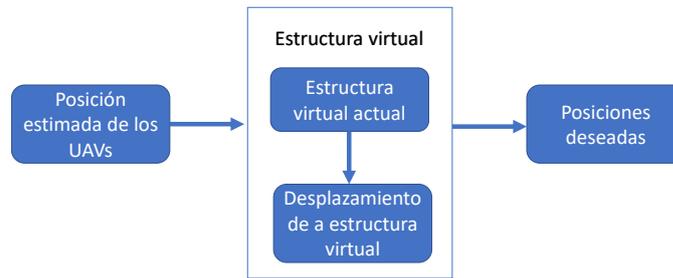


Figura 5.13: Diagrama de bloques para la generación de trayectorias usando la estructura virtual.

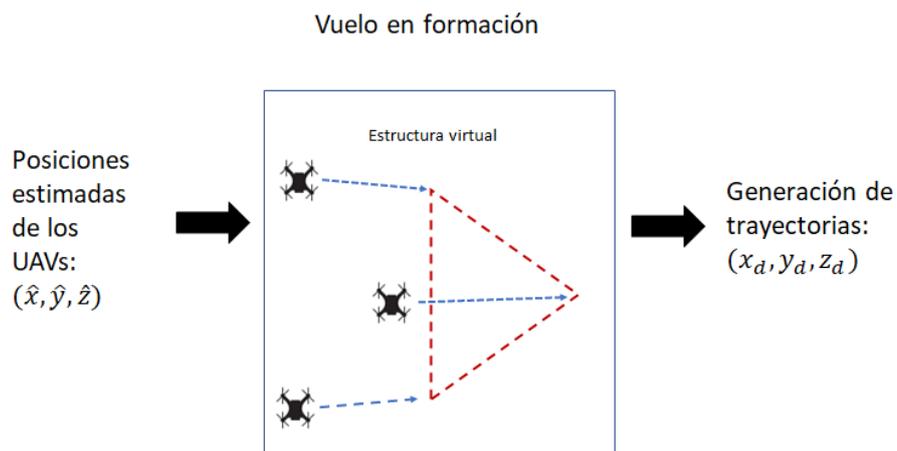


Figura 5.14: Variables utilizadas en la etapa de "Vuelo en formación".

- Modelo del UAV: Para finalizar se realiza un seguimiento de trayectoria a partir del modelo dinámico del UAV y las leyes de control necesarias para asegurar la estabilización y el desplazamiento deseado por los vehículos. En la Figura 5.15 se muestran las variables utilizadas en esta etapa para simular los movimientos realizados por cada UAV.

En la plataforma de simulación desarrollada en este trabajo de tesis se utilizó el modelo dinámico del un multirrotor obtenido por las ecuaciones de Euler-Lagrange [53] el cual está dado por las siguientes ecuaciones

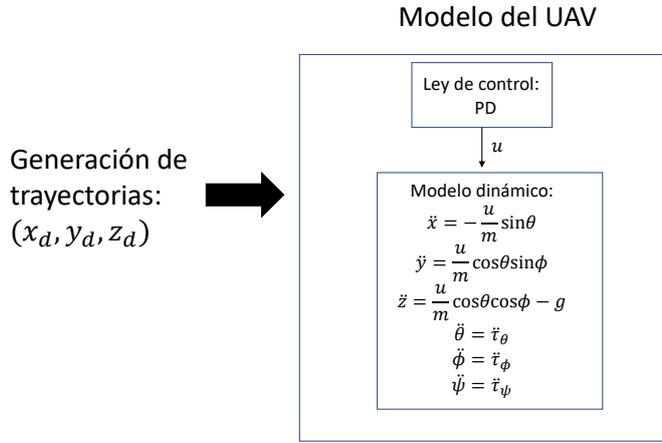


Figura 5.15: Variables usadas en la etapa de “Modelo del UAV”.

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= -\frac{u}{m} \sin \theta \\ \ddot{y} &= \frac{u}{m} \cos \theta \sin \phi \\ \ddot{z} &= \frac{u}{m} \cos \theta \cos \phi - g \\ \ddot{\theta} &= \tilde{\tau}_\theta \\ \ddot{\phi} &= \tilde{\tau}_\phi \\ \ddot{\psi} &= \tilde{\tau}_\psi\end{aligned} \tag{5.3}$$

donde u representa la entrada de control, m la masa del vehículo, g es la gravedad, (θ, ϕ, ψ) son los ángulos de Euler (ángulos *pitch*, *roll* y *yaw*) que representan la orientación del cuadricóptero, $(\tilde{\tau}_\theta, \tilde{\tau}_\phi, \tilde{\tau}_\psi)$ son los momentos angulares generados en los respectivos ángulos de Euler y $(\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}, \ddot{\theta}, \ddot{\phi}, \ddot{\psi})$ son las aceleraciones lineales y angulares.

Por otro lado, con el fin de asegurar la estabilidad de los UAVs y realizar el seguimiento de trayectoria a la posición deseada (x_d, y_d, z_d) , se utilizó un controlador PD donde la entrada de control u y momentos angulares τ_θ , τ_ϕ y τ_ψ están dados por

$$\begin{aligned}u &= -Kp_z(ez) - Kd_z(\dot{z}) \\ \tau_\theta &= -Kp_\theta(\theta) - Kd_\theta(\dot{\theta}) - (-Kp_x(ex) - Kd_x(\dot{x})) \\ \tau_\phi &= -Kp_\phi(\phi) - Kd_\phi(\dot{\phi}) - (-Kp_x(ey) - Kd_y(\dot{y})) \\ \tau_\psi &= -Kp_\psi(\psi) - Kd_\psi(\dot{\psi})\end{aligned} \tag{5.4}$$

donde $Kp_x, Kp_y, Kp_z, Kp_\theta, Kp_\phi, Kp_\psi, Kd_x, Kd_y, Kd_z, Kd_\theta, Kd_\phi$ y Kd_ψ son constantes

cuyos valores utilizados se muestran en la Tabla 5.1, $ez = \hat{z} - z_d$ es el error entre la altura deseada z_d y la altura estimada \hat{z} . Por otro lado, $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\theta}, \dot{\phi}, \dot{\psi})$ son las velocidades lineales y angulares del vehículo.

Como es posible observar a partir de las dinámicas mostradas en (5.3) los movimientos en los ejes X y Y dependen respectivamente de los ángulos θ y ϕ por lo que el control de posición se aplica a través de los momentos angulares τ_θ y τ_ϕ a partir de los errores de posición ex y ey respectivamente.

Los errores de posición están dados tanto por el error de seguimiento entre la posición actual estimada (\hat{x}, \hat{y}) respecto a la posición deseada (x_d, y_d) , y el error de consenso interactuando así con los demás vehículos. Considerando que es posible conocer la distancia entre vehículos, la constante a_{ij} les permite mantenerse siempre dentro de un área de interacción, mientras que la constante c_{ij} evita posibles colisiones cuando algún vehículo se encuentra dentro del área de colisión. Por lo tanto, mientras que el error de seguimiento mueve el vehículo hacía la trayectoria deseada, el error de consenso ayuda a evitar que los vehículos se alejen del área de interacción o colisionen por acercarse demasiado.

$$\begin{aligned} ex &= \hat{x} - x_d + \sum_{j \in N_i \setminus N_i^c} a_{ij}(\hat{x}_j - \hat{x}) - \sum_{j \in N_i^c} c_{ij}(\hat{x}_j - \hat{x}) \\ ey &= \hat{y} - y_d + \sum_{j \in N_i \setminus N_i^c} a_{ij}(\hat{y}_j - \hat{y}) - \sum_{j \in N_i^c} c_{ij}(\hat{y}_j - \hat{y}) \end{aligned} \quad (5.5)$$

Los valores de las constantes para determinar el error de consenso fueron de $a_{ij} = 0.1$ y $c_{ij} = 0.25$ y definiendo la circunferencia de colisión con radio $\rho_c = 2.5$ m y de interacción con radio $\rho = 5$ m, mientras que en la Tabla 5.1 se muestran los valores de las constantes para el control PD usadas en la plataforma de simulación. Por otro lado, los controles fueron sintonizados y acoplados gradualmente con el fin de garantizar la estabilidad y el correcto seguimiento de trayectoria.

Control de altura	Control de posición		Control de orientación		
$Kp_z = 2.6$	$Kp_x = 0.2$	$Kp_y = 0.7$	$Kp_\theta = 7.7$	$Kp_\phi = 15.5$	$Kp_\psi = 1.1$
$Kd_z = 3.6$	$Kd_x = 0.5$	$Kd_y = 1.2$	$Kd_\theta = 4.7$	$Kd_\phi = 7.2$	$Kd_\psi = 2.3$

Tabla 5.1: Parámetros utilizados en la simulación para los controles PD.

Por último, en la Figura 5.16 se presenta un diagrama a bloques del controlador aplicado al modelo dinámico de un multirroto. A partir de los errores y el estado actual del vehículo, el controlador le envía al modelo el empuje y los torques necesarios para moverse en la dirección deseada. Por otro lado, el modelo representado por la Ecuación (5.3) determina tanto las dinámicas como los cambios en las posiciones reales, de tal forma que, utilizando los sensores embebidos en estos tipos de vehículos (barómetro, unidad de medición inercial, sistema de localización, etc.) es posible estimar y retroalimentar sus valores al controlador. Es importante mencionar que el modelo dinámico presentado en la Ecuación (5.3) es una simplificación de un

vehículo multirroto en general por lo que el empuje y los torques son aplicados directamente sin considerar la caracterización y configuración del sistema de propulsión y la inercia de una estructura en particular. Se decidió utilizar este modelo dinámico debido a que el objetivo de la plataforma de simulación desarrollada es la de evaluar el desempeño del sistema de localización presentado en este trabajo de tesis para el uso de vehículos multirrotores en general y no para un tipo de vehículo en específico.

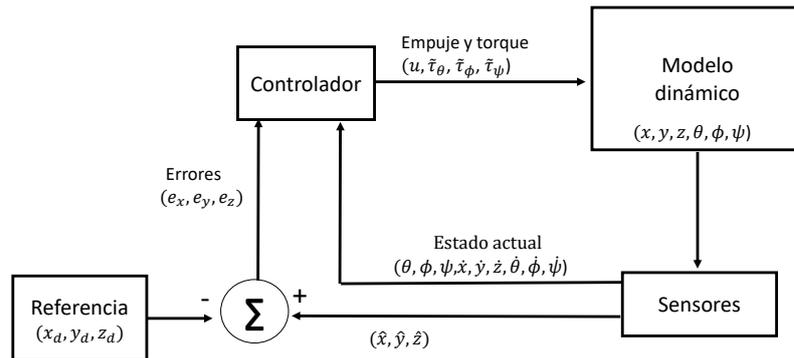


Figura 5.16: Diagrama a bloques del controlador aplicado al modelo dinámico de un multirroto.

Es importante mencionar que en la realidad el controlador no proporciona directamente el empuje y los torques, sino que modifica el voltaje proporcionado al sistema de propulsión. Como se puede observar en la Figura 5.17 regulando el voltaje V en los motores se logra controlar la velocidad angular ω , esto puede lograrse a partir de la siguiente función de transferencia al considerar que la relación entre el voltaje $V(s)$ y la velocidad angular $\omega(s)$ es lineal [57], [58]

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{k}{(L_m s + R_m)(J_m s + b_m) + k^2} \quad (5.6)$$

donde R_m es la resistencia eléctrica, L_m la inductancia del rotor, J_m el momento de inercia del rotor y b_m es la constante de fricción viscosa.

La velocidad angular junto a la aerodinámica de las hélices generan la fuerza de empuje, torque y arrastre los cuales generarán los movimientos de la estructura del multirroto en función de su masa y momentos de inercia obtenidos al utilizar un software de diseño asistido por computadora (CAD por sus siglas en inglés) [57]. En [59] se muestra la obtención de un modelo y caracterización completa de un cuadrirroto, cuyo procedimiento puede ser aplicado para un hexarroto, octarroto, etc. Sin embargo, como se mencionó anteriormente en este trabajo de tesis la intención es comprobar el sistema de localización propuesto para vehículos multirroto autónomos por lo que se eligió el modelo simplificado de la Ecuación (5.3) y no el modelo completo de un determinado vehículo.

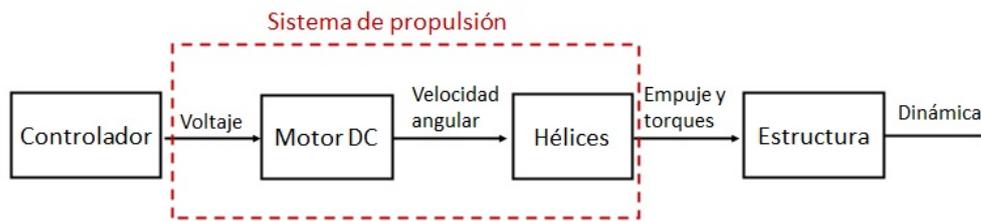


Figura 5.17: Diagrama a bloques del sistema de propulsión para un modelo completo.

5.4. Resultados

Con la finalidad de comprobar el funcionamiento de la plataforma de simulación descrita anteriormente se simuló un vuelo siguiendo la trayectoria mostrada en la Figura 5.18 donde tres UAVs nombrados UAV1, UAV2 y UAV3 de aquí en adelante, siguen una formación triangular la cual rota 90° en sentido a las manecillas del reloj en los puntos (20,20) y (20,-20). El tiempo de vuelo para recorrer la trayectoria en la simulación es de 130 s.

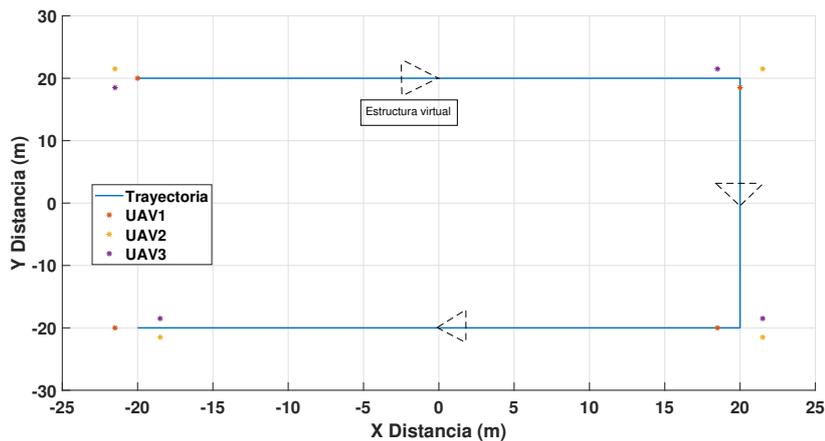


Figura 5.18: Área de simulación.

Se considera hay 3 anclas en el suelo al inicio del vuelo de los 3 UAVs colocadas en las posiciones (-18,20), (-21,21) y (-21,18). Entonces, se comienza con la primera etapa de la simulación donde se verifica que haya conexión entre las anclas y los UAVs. Es importante mencionar que se simuló un ambiente de bosque ligero considerando los efectos de ensombrecimiento ($\sigma_{sh}=4.3$ dB) y de trayectorias múltiples ($n=2.4$, $\sigma_r=2.4$ dB, $K=10.4$) en la propagación de la señal entre las anclas y los UAVs. Como se explicó en la Sección 5.3, si alguno de los UAVs pierde la conexión con cualquiera de las anclas, se liberan 3 nuevas anclas, esto porque se considera que los alcances son similares. En la Figura 5.19 se pueden observar las anclas desplegadas durante el vuelo con el fin de asegurar la estimación de posición de cada UAV. El número de anclas suman un total de 18, cuyo incremento en función del tiempo se muestra en la Figura 5.20. Esta variación se refleja en la distribución espacial alrededor de cada 20 a 25 m.

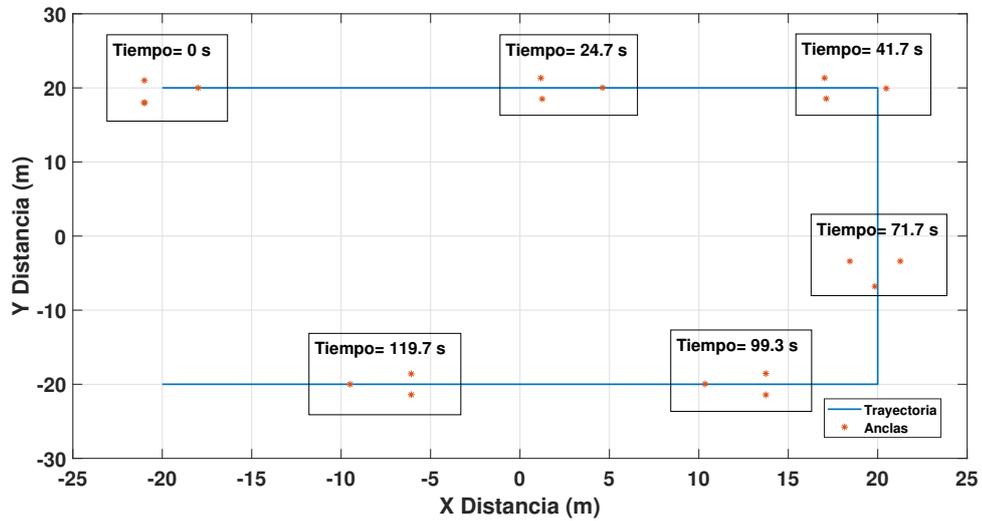


Figura 5.19: Anclas desplegadas durante la simulación.

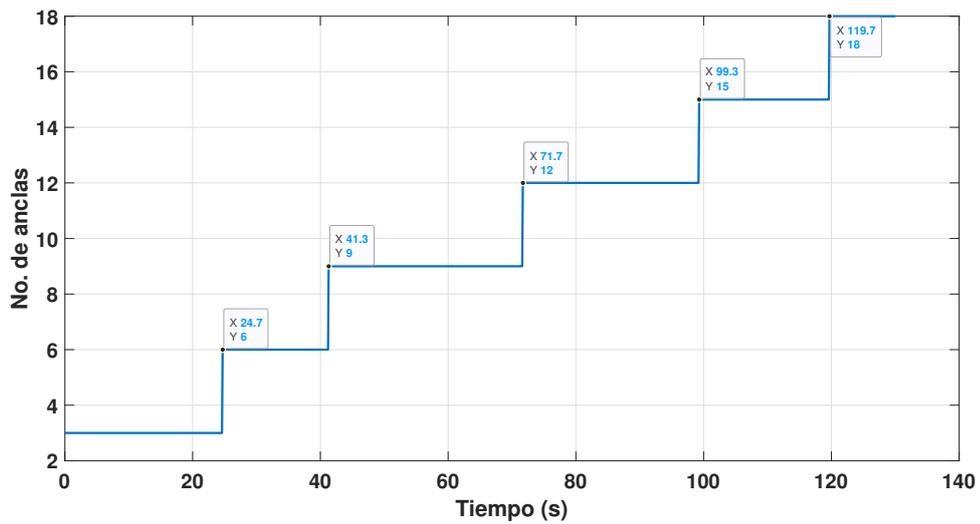


Figura 5.20: Número de anclas respecto al tiempo de vuelo.

En la segunda etapa de la simulación se realizó la estimación de la posición de los UAVs utilizando el algoritmo RA-GN descrito en la Sección 5.1. Para comprobar su precisión en la navegación de UAVs, se obtuvieron los errores a lo largo de la trayectoria los cuales se muestran en la Figura 5.21. Como se puede apreciar, estos errores están en su mayoría por debajo de los 30 cm con un RMSE de 21.26 cm para el UAV1, de 18.79 cm para el UAV2 y de 17.35 cm para el UAV3. Al comparar las Figuras 5.20 y 5.21 es posible observar que los instantes en los que se agregan nuevas anclas coinciden con menores errores de estimación por lo que se puede decir que mientras mayor es la distancia de los UAVs a las anclas, los errores de estimación aumentan durante la navegación.

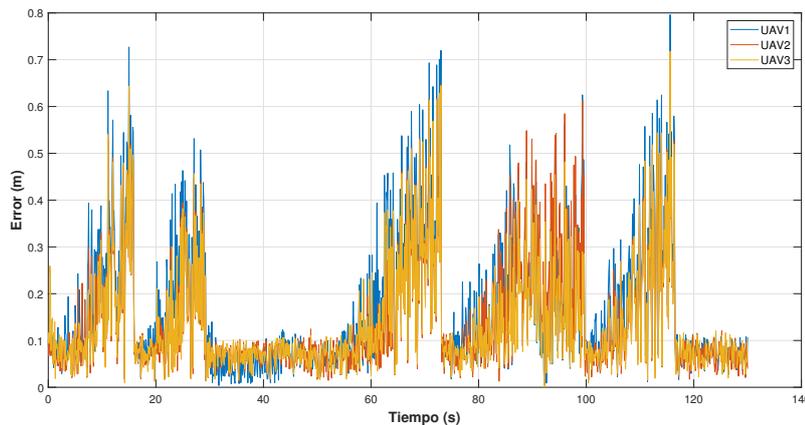


Figura 5.21: Errores en la estimación de posición de los UAVs.

En la tercera etapa de simulación se generan las trayectorias a seguir para cada UAV utilizando la estrategia de estructura virtual para la conservación de la formación. Debido a que la estructura virtual usada en esta simulación es un triángulo equilátero, la distancia entre cada uno de los UAVs debería ser la misma, en este caso de aproximadamente 3.5 m. En la Figura 5.22 se muestran las distancias entre los UAVs durante todo el vuelo, donde es posible observar que durante el desplazamiento lineal la distancia entre UAVs se mantiene con errores de aproximadamente 15 cm pero durante la rotación de la formación en los puntos (20,20) y (20,-20) la distancia entre los UAVs se perturba principalmente en el segundo punto con una magnitud cercana a 1 m. Sin embargo, se puede considerar libre de colisiones, además cabe mencionar que alrededor del segundo 90 existe mayor variación en los errores de estimación (véase Figura 5.21).

Para concluir esta sección, a continuación se mostrarán y explicarán los resultados de las trayectorias obtenidas. En la Figura 5.23 se observan las trayectorias generadas al final de la simulación siguiendo la trayectoria deseada e intentando conservar la formación en todo momento, mientras que en la Figura 5.24 se muestran los desplazamientos de cada uno de los UAVs sobre los ejes X , Y y Z respecto al tiempo de vuelo, en esta figura es posible observar que los 3 UAVs conservan sus respectivas trayectorias en todo momento además las variaciones en su altura son del orden de un par de centímetros las cuales coinciden con los cambios de dirección en el plano XY . Por otro lado, la Figura 5.25 se ilustra los cambios de orientación realizados sobre los ángulos *pitch* θ , *roll* ϕ con el fin de realizar los desplazamientos deseados.

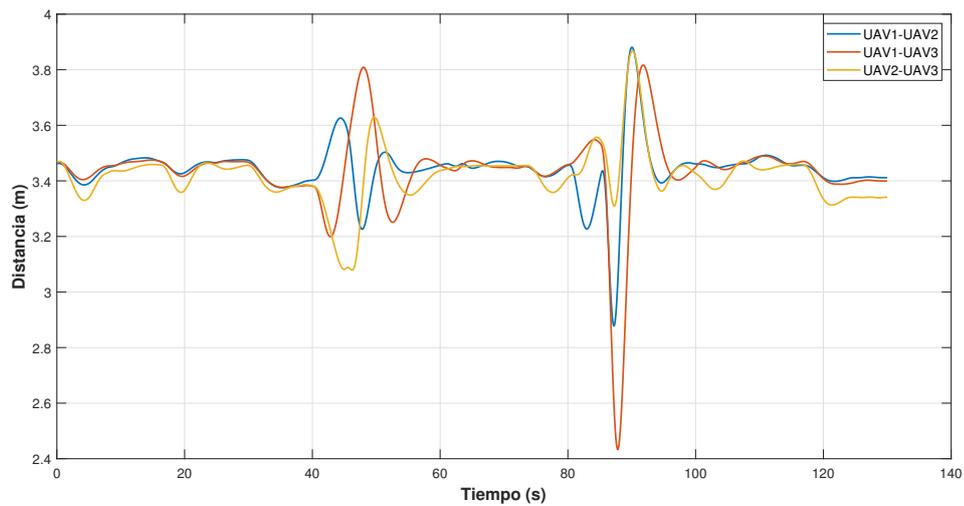


Figura 5.22: Distancias entre UAVs durante la navegación.

Así mismo, es posible observar que las variaciones en estos ángulos se dan durante los cambios de dirección en el plano XY debido a que intentan mantener la formación mientras la estructura virtual rota en dirección de la trayectoria deseada. En las gráficas presentadas se puede apreciar que los UAVs son capaces de realizar un seguimiento de trayectoria adecuado utilizando las posiciones estimadas con el algoritmo RA-GN propuesto en este trabajo de tesis. A partir de lo anterior, y junto a las gráficas analizadas previamente, se confirma que es posible llevar a cabo la estrategia propuesta al menos a nivel simulación.

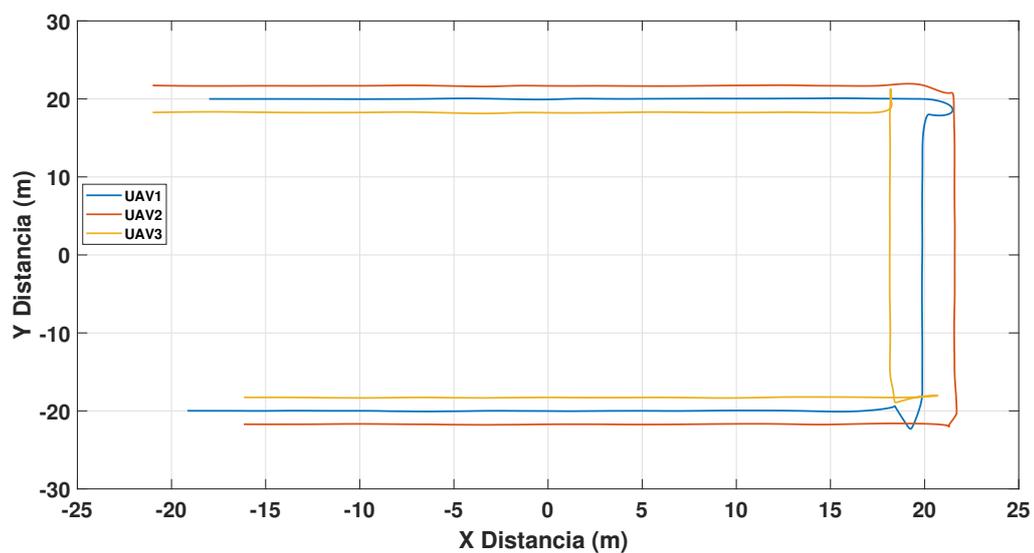


Figura 5.23: Trayectorias realizadas por los UAVs en la simulación.

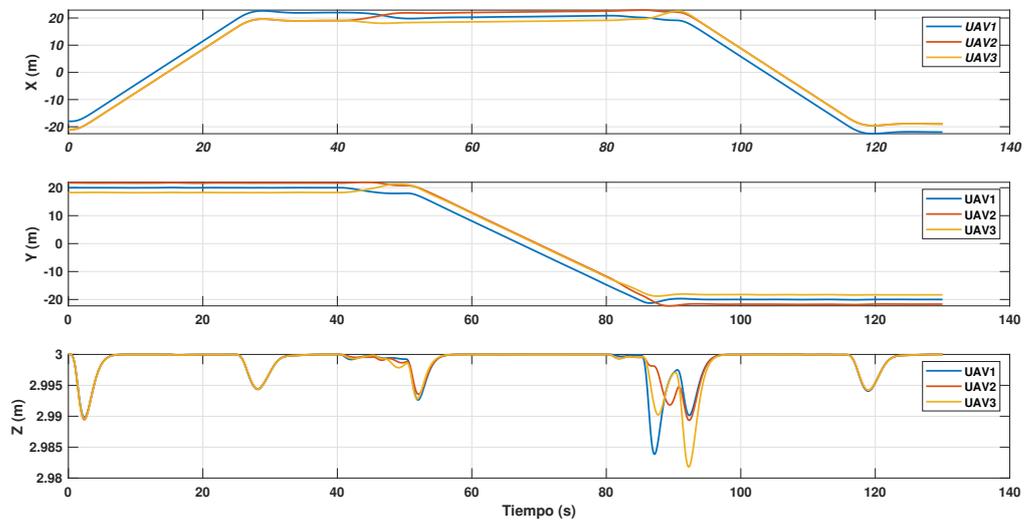


Figura 5.24: Desplazamientos realizados por los UAVs en cada uno de los ejes XYZ durante la simulación.

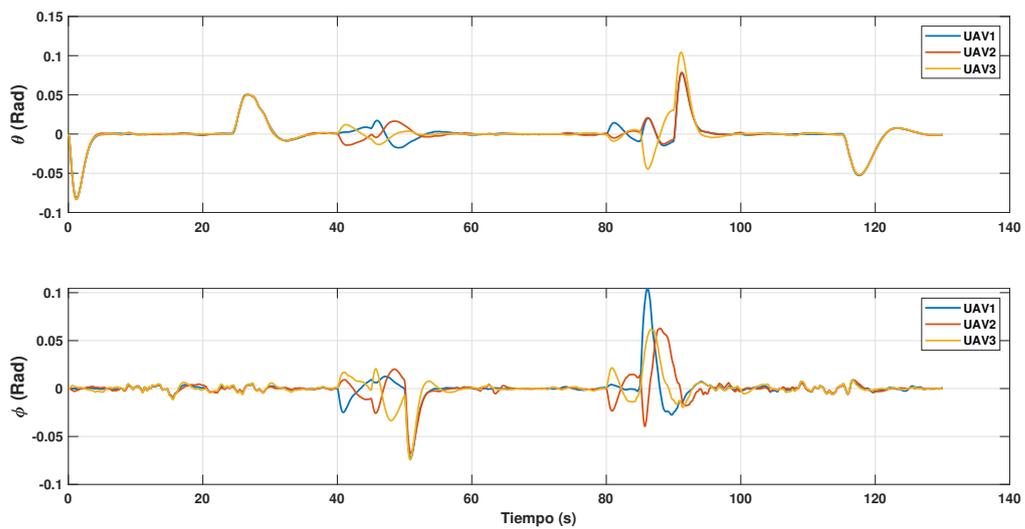


Figura 5.25: Cambios en la orientación realizados por los UAVs durante la simulación.

Pruebas experimentales del algoritmo RA-GN

En el capítulo anterior se propusieron tanto un nuevo algoritmo de posicionamiento como una estrategia de navegación. Ahora en este capítulo, el algoritmo de posicionamiento es probado bajo condiciones prácticas y comparado con un sistema de localización comercial con el fin de verificar si es posible mejorar la estimación de posición en términos de precisión con sistemas no redundantes como se demostró en simulación anteriormente.

6.1. Mediciones de distancia en exteriores

Debido a que los métodos de posicionamiento estudiados y el algoritmo de posicionamiento propuesto en esta tesis se basan en mediciones de distancia entre las anclas y el dispositivo a estimar, el principal problema se encuentra en los errores obtenidos durante la medición. Por tal motivo, lo primero que se analizará son las mediciones de distancia bajo diferentes condiciones.

Estas mediciones se realizaron durante el invierno de 2021 en el campo de fútbol y una de las áreas verdes del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, en Zacatenco, Ciudad de México. El área verde escogida está compuesta de árboles de varios tipos y edades con diversas densidades, lo que permitió considerarse como una zona suburbana semi boscosa.

Para hacer estas mediciones se usaron dos módulos de UWB del sistema de localización en tiempo real de Decawave (DRTL5 por sus siglas en inglés) colocados en unos tripiés. Se configuraron estos módulos siguiendo las recomendaciones del fabricante [19] de tal forma que uno de los módulos toma el papel de ancla y el otro de nodo etiqueta para fines de medición de distancia (véase Apéndice C).

Primeramente, se comparó el alcance logrado al medir la distancia entre dos módulos de UWB en un ambiente con condiciones cercanas a espacio libre comparada con ambientes con múltiples obstáculos. En la Figura 6.1 se pueden observar un par de módulos de UWB (etiquetados como A y B en la figura) colocados a una altura de 1.5 m con línea de vista entre ellos dentro de dos diferentes escenarios. En el primero no hay ningún obstáculo que pueda afectar

a la señal donde se obtuvo un alcance máximo d_{AB} de 18 m y después de 500 mediciones se determinó que se tiene una media del error de 20.79 cm y una desviación estándar de 10.19 cm. Por otro lado, en el segundo escenario existe la presencia de varios árboles lo cual reduce el alcance máximo a 16 m y también reduciendo la media del error a 3.03 cm y una desviación estándar de 5.94 cm lo que indica una mejora en la precisión bajo condiciones de trayectorias múltiples. Lo anterior se puede atribuir al hecho que los módulos fueron previamente calibrados por el fabricante para operar en escenarios con múltiples obstáculos.

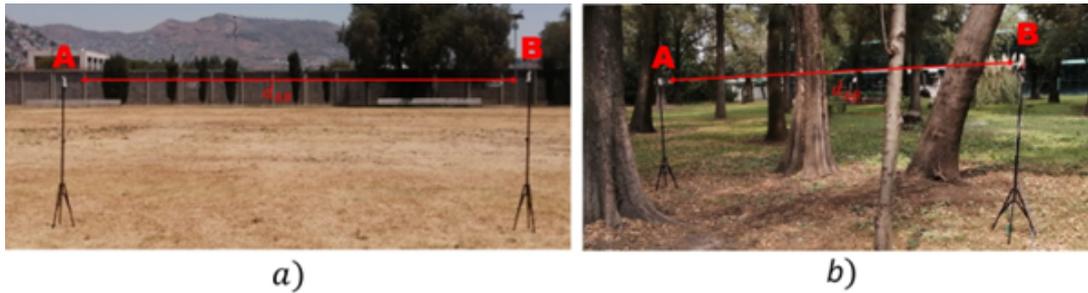


Figura 6.1: Dos diferentes escenarios con condiciones de línea de vista entre ellos: a) escenario libre de obstáculos, b) escenario semi-boscoso con árboles alrededor.

De igual manera, se realizaron distintas mediciones bajo condiciones de ausencia de línea de vista con la finalidad de observar cómo las obstrucciones entre módulos afectan el alcance. Para esto se midieron las distancias entre los módulos cuando hay diferentes tipos de árboles con distintos diámetros de tronco. En la Figura 6.2 se muestran 4 casos con condiciones de ausencia de línea de vista y en la Tabla 6.1 se muestran las mediciones obtenidas en términos de alcance, media del error y desviación estándar donde se puede observar cómo el alcance se ve afectado principalmente por los troncos de los árboles grandes pero los errores aumentan con la presencia de los árboles pequeños debido al follaje.

Caso	Alcance (m)	Media (cm)	Desviación estándar (cm)
1	4	3.02	5.64
2	10	10.05	3.94
3	4	2.59	4.78
4	3.5	7.7	15.88

Tabla 6.1: Distancias medidas con condiciones de ausencia de línea de vista.

6.2. Pruebas experimentales del algoritmo RA-GN

Con la finalidad de demostrar la eficiencia del algoritmo RA-GN para la estimación de posición bajo condiciones prácticas, se instalaron 4 anclas y un nodo etiqueta (tag) el cual toma el lugar del UAV del que se busca estimar la posición, dentro de un escenario semi boscoso rodeado de árboles como se muestra en la Figura 6.3. El escenario de pruebas será de 8×8 m con un total de 9 árboles de pino con alturas mayores a los 10 m. La posición y diámetro de

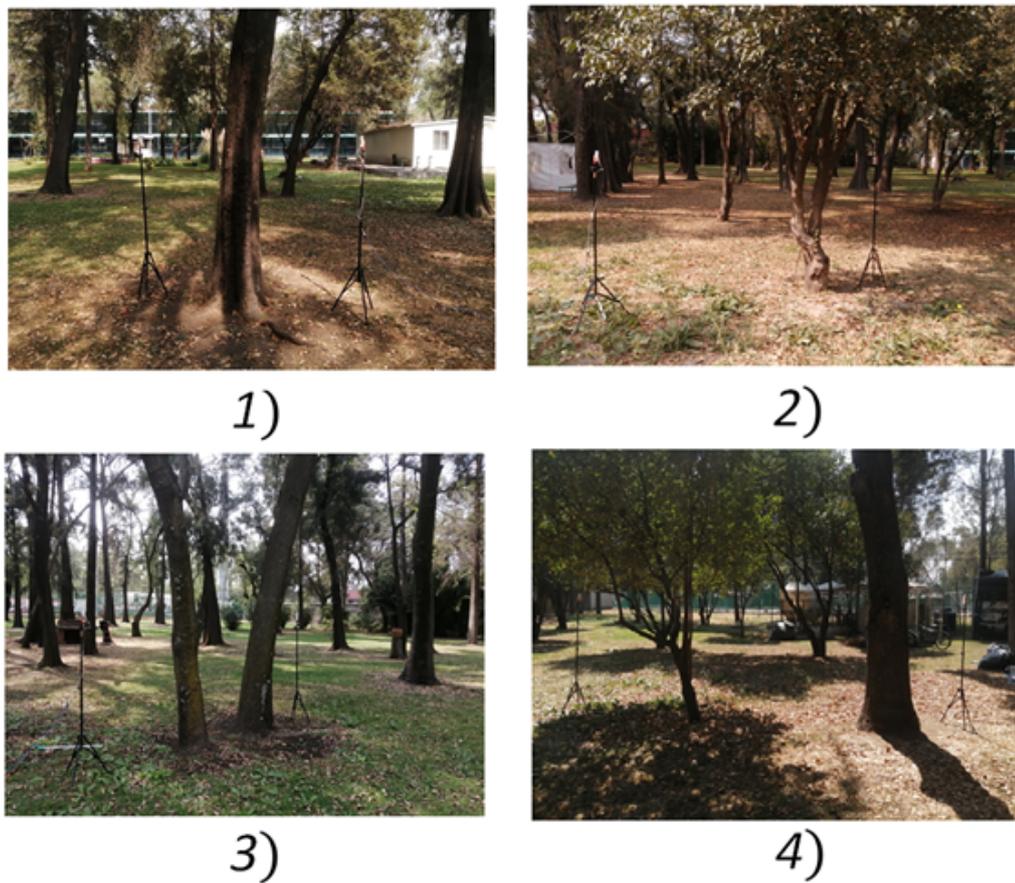


Figura 6.2: Cuatro diferentes escenarios con condiciones de ausencia de línea de vista entre ellos: 1) un árbol grande con un tronco de 35 cm de diámetro, 2) un árbol pequeño con un tronco de 10 cm de diámetro, 3) dos árboles grandes con troncos de 25 y 30 cm de diámetro, 4) un árbol grande y uno pequeño con troncos de 35 y 10 cm de diámetro.

cada árbol se reportan en la Tabla 6.2.



Figura 6.3: Cuatro anclas y un nodo etiqueta dentro de un escenario semi boscoso.

Posición del árbol	Diámetro del árbol (cm)
(1.4,-2)	40
(1.2,-4.2)	35
(-2.35,-1.4)	15
(-2.35,-2.2)	40
(6.35,1.75)	22
(-3.15,2.68)	35
(5.1,2.4)	35
(5.1,1.4)	30

Tabla 6.2: Posición y diámetro de cada árbol dentro del escenario de pruebas.

Las posiciones de las 4 anclas fueron registradas como $A_1(0, 4)$, $A_2(-5, 0)$, $A_3(5, 0)$, y $A_4(0, -6)$ a una altura de 1.6 m mientras el nodo etiqueta fue colocado en diferentes posiciones sobre un tripié a la misma altura con la finalidad de mantener todos los módulos de UWB en el plano 2D. Las posiciones analizadas y las condiciones de propagación de línea de vista (LOS por sus siglas en inglés) y de ausencia de línea vista o de no línea de vista (NLOS por sus siglas en inglés) son mostradas en la Tabla 6.3. Como se puede observar en las trayectorias entre el nodo etiqueta y cada una de las anclas se incluye al menos una con condiciones NLOS.

La Figura 6.4 representa el área de interés con las posiciones de las anclas, los árboles y las posiciones analizadas. Cada posición es estimada utilizando el algoritmo RA-GN y comparada

Número de posición j	Posición del nodo etiqueta	Condiciones de propagación			
		A_1	A_2	A_3	A_4
1	(0,-3.7)	LOS	NLOS	LOS	LOS
2	(-4.6,2.05)	LOS	LOS	LOS	NLOS
3	(7,0)	NLOS	LOS	LOS	LOS
4	(3,-2.5)	LOS	NLOS	LOS	LOS
5	(-3.35,-4)	LOS	LOS	NLOS	LOS
6	(-4,-7)	NLOS	LOS	LOS	LOS

Tabla 6.3: Posiciones y condiciones de propagación respecto a cada ancla.

con la estimación dada por el DRTLS instalado en los módulos DWM1001 los cuales utilizan tecnología UWB.

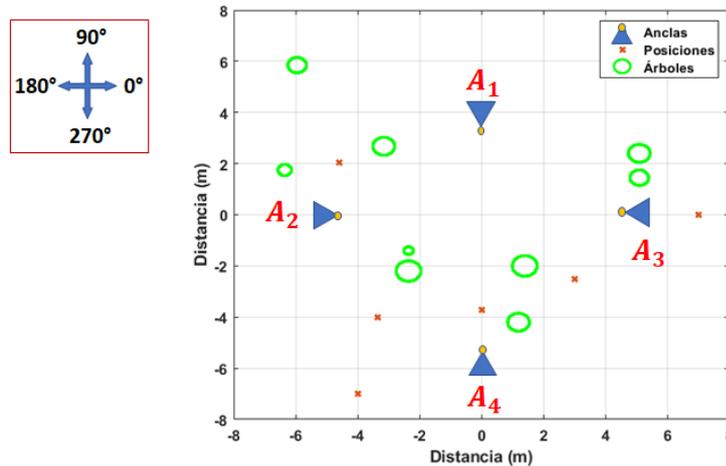


Figura 6.4: Distribución de los elementos considerados en las pruebas experimentales.

De igual manera, es importante mencionar que el fabricante de los módulos DWM1001 recomienda instalarlos en posición vertical como se muestra en la Figura 6.5. La razón detrás de esta posición yace en que la antena se encuentra polarizada con un patrón de radiación casi-omnidireccional en el plano horizontal lo cual resulta beneficioso para las aplicaciones de localización. A pesar de eso, pueden existir ciertas variaciones en las ganancias de la antena dependiendo de la posición angular con la que se conectan dos módulos afectando directamente la potencia de la señal recibida. La posición angular es representada como θ en la Figura 6.5 tomando como referencia el circuito impreso del módulo DWM1001. Debido a que se busca analizar la efectividad del algoritmo RA-GN bajo diversas condiciones, la posición angular también es considerada al variar su valor en cada una de las posiciones analizadas. Asimismo, la posición angular de cada ancla es fijada con la intención de que cada una de ellas quede de cara al centro de área de pruebas, siendo $\theta_1 = 270^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 180^\circ$ y $\theta_4 = 90^\circ$ las posiciones angulares de A_1 , A_2 , A_3 y A_4 respectivamente. Por otro lado, en el caso del nodo etiqueta, el ángulo θ es rotado cada 20° desde 0° hasta 360° con la finalidad de observar los efectos

que tiene esta variable dentro de la estimación proporcionada tanto por el algoritmo RA-GN y el DRTLS. Es importante mencionar que el fabricante [19] únicamente menciona que para calcular la estimación a partir de 4 o más anclas los módulos DWM1001 utilizan el método de Máxima Verosimilitud pero nunca revelan los detalles del algoritmo utilizado para calcular la posición estimada con solo 3 anclas.

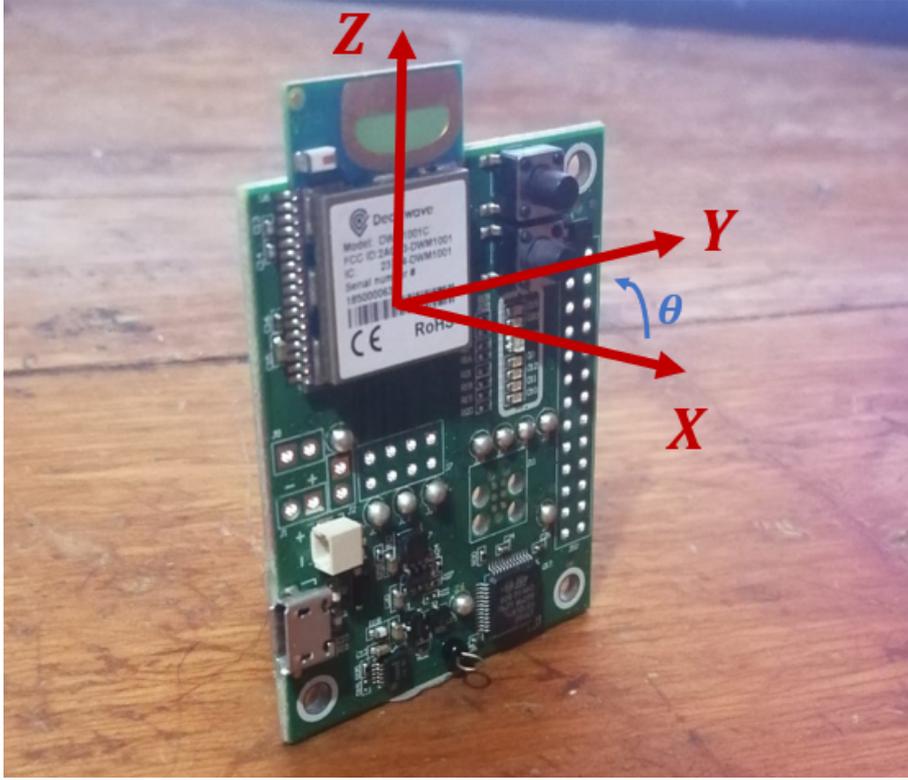


Figura 6.5: Módulo DWM1001 en posición vertical ilustrando el ángulo de referencia (θ) considerado como posición angular.

Para poder comparar la precisión de la estimación obtenida con el algoritmo RA-GN respecto al proporcionado por el DRTLS, se usa como parámetro de comparación el RMSE de la distancia entre la posición estimada y las anclas utilizadas para la estimación.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2} \quad (6.1)$$

donde N es el número de anclas utilizadas para la estimación de la posición las cuales pueden ser 3 o 4 dependiendo de la conexión entre las anclas y el nodo etiqueta. El error e_i es calculado como la diferencia entre \tilde{d}_i , correspondiente a la distancia entre la posición estimada (\tilde{x}, \tilde{y}) y la posición (x_i, y_i) de la i -ésima ancla, y \hat{d}_i la cual es la distancia medida entre el nodo etiqueta y la i -ésima ancla. En otras palabras

$$e_i = \tilde{d}_i - \hat{d}_i = \sqrt{(\tilde{x} - x_i)^2 + (\tilde{y} - y_i)^2} - \hat{d}_i \quad (6.2)$$

Los resultados obtenidos fueron analizados utilizando la CDF del RMSE con un total de 600 mediciones por cada posición y cada ángulo θ donde el nodo etiqueta fue colocado. Las Tablas 6.4-6.15 muestran la información obtenida por las mediciones realizadas. Estas tablas fueron divididas en dos grupos, en el primer grupo están las Tablas 6.4-6.9 y muestran los resultados obtenidos para cada posición analizada al considerar únicamente las tres anclas con condiciones de línea de vista; mientras que los resultados mostrados en las Tablas 6.10-6.15 muestran la información obtenida al considerar las 4 anclas disponibles incluyendo aquella con condiciones de ausencia de línea de vista. Los resultados son mostrados con los valores de RMSE obtenidos para una probabilidad del 90 %. Para ello se considerará como $RMSE_1$ a los valores proporcionados por el DRTLS de los módulos de UWB, mientras que los valores obtenidos por el algoritmo RA-GN serán representados por la variable $RMSE_2$. Además, con la finalidad de observar la diferencia en precisión entre ambos resultados se presenta la variable $\Delta_{RMSE} = RMSE_1 - RMSE_2$ junto a la media correspondiente Δ_μ para cada posición. En todas estas tablas también se presentan los valores de la media (μ) y la desviación estándar (σ) de los errores en medición de distancia dados por los módulos de UWB. Por último, se muestran los porcentajes de conexión exitosa $\rho(\%)$ entre las anclas y el nodo etiqueta. Se considerará como conexión exitosa cuando las mediciones de distancia entre las anclas y el nodo etiqueta pudieron ser registrados por los módulos de UWB.

6.2.1. Resultados para tres anclas

La Tabla 6.4 muestra las mediciones obtenidas cuando el nodo etiqueta se encuentra la posición (0,-3.7). Se puede observar que en la mayoría de las mediciones se obtuvo un excelente valor de $\rho(\%)$ excepto para el caso de $\theta = 120^\circ$ donde no fue posible conectar con al menos 3 anclas demostrando que existen posiciones angulares que pueden afectar de manera crítica la conexión entre las anclas y el nodo etiqueta. Por otro lado, es importante observar que en todos los casos donde fue posible realizar la estimación de posición se obtuvo un menor valor de RMSE para el algoritmo RA-GN comparado con el obtenido por el DRTLS, con una diferencia mínima de 0.1 cm para $\theta = 80^\circ$ y una máxima de 12.7 cm para $\theta = 60^\circ$.

θ (grados)	$RMSE_1$ (cm)	$RMSE_2$ (cm)	Δ_{RMSE} (cm)	ρ (%)	μ (cm)	σ (cm)
0	16.9	12.2	4.7	98.66	8.38	6.10
20	15.2	10.9	4.1	99.50	7.59	6.91
40	15.3	11.4	3.9	100	7.83	5.81
60	23.7	11	12.7	99.66	7.43	6.93
80	12.1	12	0.1	100	9.55	8.27
100	10.4	8.9	1.5	99.83	9.52	7.46
120	-	-	-	-	-	-
140	10	9.1	0.9	100	5.68	3.73
160	10.7	10.1	0.6	100	7.5	4.20
180	10.7	10.1	0.6	100	7.5	4.22
200	19.3	11.9	7.4	99.66	12.11	4.22
220	19.1	12.2	6.9	100	12.69	5.29
240	14.6	12	2.6	99.5	9.74	5.68
260	14.5	10.8	3.7	100	10.84	5.69
280	15.3	11.1	4.2	100	9.2	5.31
300	14.2	10.4	3.7	98	7.11	4.91
320	18.3	13	5.3	92.5	9.65	5.93
340	18.3	13.9	4.4	99.16	9.96	6.49
			$\Delta\mu = 3.9$			

Tabla 6.4: RMSE obtenido en la posición (0, -3.7) usando tres anclas.

La Tabla 6.5 muestra las mediciones obtenidas cuando el nodo etiqueta se encuentra en la posición (-4.6,2.05). En este caso se pueden observar problemas de conexión desde $\theta = 140^\circ$ hasta $\theta = 260^\circ$, especialmente en el caso de $\theta = 200^\circ$ ya que el porcentaje de $\rho(\%)$ es menor al 90 % para estos casos, por lo que no fue posible comparar los valores de RMSE. Además, se pudo notar que existe un incremento en los valores de μ comparado a los resultados obtenidos en la posición analizada anteriormente (ver la Tabla 6.4), lo cual provoca un aumento en los valores de RMSE para el DRTLS. A pesar de eso, el algoritmo RA-GN demuestra tener una mejor resolución al obtener un valor de RMSE mínimo de 3.1 cm ($\theta = 100^\circ$) con una diferencia de 33.7 cm para el peor caso del DRTLS ($\theta = 120^\circ$).

θ (grados)	$RMSE_1$ (cm)	$RMSE_2$ (cm)	Δ_{RMSE} (cm)	$\rho(\%)$	μ (cm)	σ (cm)
0	29.3	5.6	23.7	97.83	21.63	9.78
20	36.6	6.8	29.8	95.33	21.44	12.07
40	35.4	6.6	28.8	95	20.18	10.87
60	26.7	5.9	20.8	98.17	16.01	11.40
80	28.9	6	22.9	100	14.30	11.75
100	12.1	3.1	9	99.83	19.07	10.79
120	40.6	6.9	33.7	91.83	14.29	12.55
140	-	-	-	74.83	14.64	11
160	-	-	-	74.83	19.05	8.97
180	-	-	-	86.83	17.95	5.24
200	-	-	-	-	-	-
220	-	-	-	68	21.94	7.29
240	-	-	-	46.67	21.23	7.04
260	-	-	-	38.83	22.04	6.45
280	14.4	10.8	3.6	24.45	9.2	5.96
300	14.1	9.1	5	100	26.98	4.71
320	20.8	7.8	13	100	26.41	7.58
340	18.3	6.8	11.5	100	26.94	6.48
			$\Delta\mu = 17.2$			

Tabla 6.5: RMSE obtenido en la posición (-4.6, 2.05) usando tres anclas.

La Tabla 6.6 muestra las mediciones obtenidas cuando el nodo etiqueta se encuentra en la posición (7,0). En esta posición también existen algunos problemas de conexión ya que hay tres casos donde no fue posible registrar la estimación de posición. Para la mayoría de los casos donde la estimación fue posible, el RMSE obtenido por el DRTLS es menor a 20 cm, lo cual es debido al relativamente bajo error en las mediciones de distancia como se puede observar en los valores de μ . A pesar de eso, es importante notar que los valores obtenidos por el algoritmo RA-GN lograron mejorar la estimación en términos de RMSE.

θ (grados)	$RMSE_1$ (cm)	$RMSE_2$ (cm)	Δ_{RMSE} (cm)	ρ (%)	μ (cm)	σ (cm)
0	15.9	8.2	7.7	97.5	8.8	6.72
20	13.6	10.4	3.2	98.67	10.42	7.80
40	-	-	-	30.67	16.24	6.93
60	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	88.67	27.36	39.85
100	16.5	5.6	10.9	92.5	5.35	3.24
120	13.3	4.7	3.4	99.33	4.46	3.62
140	15.2	4.6	10.6	93.17	5.14	4.02
160	13.3	3	10.3	99.83	6.27	3.31
180	13.4	4	9.4	100	8.18	4.10
200	14.5	3.6	10.9	100	7.53	4.93
220	-	-	-	-	-	-
240	10.8	3.2	7.6	98	7.10	4.52
260	10.4	3.7	6.7	99.67	9.05	6.04
280	10.8	2.9	7.9	100	7.50	4.99
300	-	-	-	-	-	-
320	14.4	4.5	9.9	99.83	5.04	5.01
340	17.5	3.4	14.1	100	9.24	5.68
			$\Delta\mu = 8.6$			

Tabla 6.6: RMSE obtenido en la posición (7,0) usando tres anclas.

La Tabla 6.7 muestra las mediciones obtenidas cuando el nodo etiqueta se encuentra en la posición (3,-2.5). Se puede observar que para el caso de $\theta = 200^\circ$ la conexión se perdió por completo, mientras que para los casos $\theta = 40^\circ$ y $\theta = 340^\circ$ el porcentaje de conexión es menor al 90 %. Si se comparan los valores de RMSE obtenidos por el algoritmo RA-GN y el DRTLS, se puede observar solo unos pocos centímetros de diferencia para la mayoría de los casos excepto $\theta = 160^\circ$ donde el valor del RMSE dado por el algoritmo RA-GN es 13.3 cm menor al obtenido por el DRTLS.

θ (grados)	$RMSE_1$ (cm)	$RMSE_2$ (cm)	Δ_{RMSE} (cm)	ρ (%)	μ (cm)	σ (cm)
0	6.7	4.1	2.6	98.67	18.08	3.83
20	8	5.4	1.6	95.83	21.04	4.62
40	-	-	-	44	31.46	9.84
60	15.3	12.3	3	99.17	26.54	11.33
80	30.5	26.8	3.7	100	39.61	26.43
100	11.9	10.7	1.2	100	25.54	8.13
120	5.5	3.3	2.2	99.50	16.57	3.33
140	5.5	3	2.5	99.50	18.23	4.70
160	16.6	3.3	13.3	100	22.56	6.06
180	12.5	10.1	2.4	99.83	17.08	10.5
200	-	-	-	-	-	-
220	14.7	12.5	2.2	99.67	18.30	7.93
240	7.7	6.3	1.4	100	20.72	5.32
260	8.8	6.4	2.4	99.83	15.25	5.92
280	7.8	5.5	2.3	99.33	17.01	5.15
300	6.5	4.1	2.4	99.83	19.06	3.66
320	5.8	3	2.8	99	16.76	3.52
340	-	-	-	80.83	15.30	4.07
			$\Delta\mu = 2.88$			

Tabla 6.7: RMSE obtenido en la posición (3,-2.5) usando tres anclas.

En la Tabla 6.8 se muestra que cuando el nodo etiqueta se encuentra en la posición (-3.35,-4) en la mayoría de los casos se logra un alto porcentaje de ρ (%) excepto por tres casos donde el porcentaje es menor al 90%. En esta posición es importante observar valores relativamente grandes para los errores de distancia medidos tanto en media μ y desviación estándar σ , especialmente para el caso de $\theta = 0^\circ$ donde los valores de RMSE son mayores a 1 m para ambos métodos. Por otro lado, para los casos $\theta = 180^\circ$ y $\theta = 240^\circ$ se tiene tanto problemas de conexión como altos valores de σ .

θ (grados)	$RMSE_1$ (cm)	$RMSE_2$ (cm)	Δ_{RMSE} (cm)	ρ (%)	μ (cm)	σ (cm)
0	182.8	112.9	69.9	99.83	107.34	144.67
20	19	6.1	13.1	99.67	9.53	5.62
40	18.7	6.3	12.4	99.83	11.73	4.67
60	21.3	5.7	15.6	99.83	9.32	4.18
80	17.5	5.4	12.1	100	4.95	2.87
100	16.4	5.5	10.9	100	3.41	2.32
120	7.6	5.8	18	100	6.71	6.01
140	18	6.9	11.1	92.5	7.79	7.07
160	7.9	3.6	4.3	99.67	4.20	2.68
180	-	-	-	87.5	40.02	166.78
200	-	-	-	87.5	12.34	6.60
220	5.6	8.2	-2.6	96.5	11.70	6.23
240	-	-	-	53	31.29	108.97
260	20.9	9.4	11.5	99.5	15.35	4.77
280	11.9	3.8	8.1	100	21.91	10.65
300	19.4	7.4	12	100	26.32	15.25
320	19.9	8.1	11.8	99.67	15.80	3.86
340	14.9	11.8	3.1	100	13.18	6.53
			$\Delta\mu = 14.02$			

Tabla 6.8: RMSE obtenido en la posición (-3.35,-4) usando tres anclas.

Finalmente, en la Tabla 6.9 es posible observar que la posición (-4,-7) es un punto con grandes problemas de conexión los cuales pueden ser atribuidos a la relativamente larga distancia de dos de las anclas (A_1 y A_3) y principalmente a las obstrucciones de follaje entre el nodo etiqueta y el ancla A_1 . En esta posición solo 6 casos fueron capaces de obtener más del 90 % de conexión, sin embargo, es posible ver que incluso bajo estas condiciones el algoritmo RA-GN fue capaz de obtener valores más bajos de RMSE comparados a los correspondientes del DRTLS.

θ (grados)	$RMSE_1$ (cm)	$RMSE_2$ (cm)	Δ_{RMSE} (cm)	ρ (%)	μ (cm)	σ (cm)
0	14.3	11.4	2.9	99.83	8.42	4.72
20	-	-	-	84.83	8.40	7.33
40	14.3	10.9	3.4	98	8.03	5.10
60	20.9	11.3	9.6	91.17	8.51	4.28
80	-	-	-	86.5	6.91	6.91
100	-	-	-	-	-	-
120	13.2	8.3	4.9	99.67	9.23	7.83
140	9.8	7.1	2.7	99.67	9.34	6.53
160	-	-	-	89.83	39.03	54.78
180	-	-	-	-	-	-
200	-	-	-	9.67	9.38	7.22
220	-	-	-	22.17	17.77	59.17
240	-	-	-	12.67	16.63	10.81
260	-	-	-	55.17	8.73	5.34
280	-	-	-	19.83	24.77	19.17
300	-	-	-	88	17.19	10.14
320	-	-	-	19.5	11.26	7.39
340	14.9	9.9	5	100	8.01	07.81
			$\Delta\mu = 4.75$			

Tabla 6.9: RMSE obtenido en la posición (-4,-7) usando tres anclas.

Los resultados analizados en las mediciones obtenidas demuestran ampliamente la eficiencia del algoritmo RA-GN en la estimación de posición con sistemas no redundantes usando solamente tres anclas. Sin embargo, debido a que hay un total de cuatro anclas dentro del área de interés, es posible decir que algunas de las estimaciones proporcionadas por el DRTLS fueron calculadas usando la información proporcionada por las cuatro anclas. Por tal motivo, en la siguiente sección se analizarán los resultados obtenidos al estimar la posición usando el algoritmo RA-GN con las cuatro anclas, incluyendo aquella con condiciones de NLOS.

6.2.2. Análisis para cuatro anclas

En esta sección se analizarán los resultados obtenidos al considerar como una cuarta ancla, aquella con condiciones de NLOS. En las Tablas 6.10-6.15 se presentan la media y la

desviación estándar de los errores de medición de distancia de la cuarta ancla con condiciones de NLOS representados por μ_{NLOS} y σ_{NLOS} , respectivamente. Además, los resultados mostrados se limitan a las posiciones angulares θ donde el porcentaje de conexión es $\rho > 0$, ya que de lo contrario significa que la cuarta ancla no se conectó y solo se estimó la posición usando las tres primeras anclas resultando los mismos valores presentados en las Tablas 6.4-6.9.

En la Tabla 6.10 se muestran los resultados obtenidos en la posición (0,-3.7). Se puede observar que en los casos de $\theta = 40^\circ$, $\theta = 60^\circ$ y $\theta = 300^\circ$, los errores de distancia presentados por μ_{NLOS} y σ_{NLOS} son mucho más grandes y esto impacta directamente en la estimación obtenida por el algoritmo RA-GN incrementando en gran medida el RMSE, principalmente para los casos de $\theta = 40^\circ$ y $\theta = 60^\circ$ donde la estimación resulta peor que la proporcionada por el DRTLS, mientras que en el caso de $\theta = 300^\circ$ el RMSE del algoritmo RA-GN sigue siendo menor ya que el porcentaje de conexión de esta ancla es demasiado pequeño como para afectar este valor. En general, para los otros casos de θ se puede observar un ligero incremento del RMSE dado por el algoritmo RA-GN comparado con los resultados mostrados con solo tres anclas (ver Tabla 6.4) pero se mantiene la tendencia de tener un RMSE menor al del DRTLS.

θ (grados)	$RMSE_1$ (cm)	$RMSE_2$ (cm)	Δ_{RMSE} (cm)	ρ (%)	μ_{NLOS} (cm)	σ_{NLOS} (cm)
40	15.3	89.9	-74.6	92	258.12	160.66
60	23.7	35.6	-11.9	88.83	114.13	106.83
80	12.1	11.9	0.2	99.16	4.91	22.15
100	10.4	9.3	1.1	81	5.23	22.88
140	10	8.9	1.1	100	5.65	23.76
160	10.7	10	0.7	100	6.89	25.13
180	10.7	10	0.7	94.83	6.13	26.25
200	19.3	13.1	6.2	92.66	4.79	21.89
220	19.1	12.6	6.5	94.50	4.95	22.24
240	14.6	11.7	2.9	77.66	5.54	23.54
260	14.5	10.4	4.1	25.16	6.71	25.91
300	14.2	9.1	5.1	2	130.50	114.24
			$\Delta\mu = -4.8$			

Tabla 6.10: RMSE obtenido en la posición (0, -3.7) usando cuatro anclas.

Por otro lado, las Tablas 6.11-6.15 muestran los resultados de las posiciones $j = 2, \dots, 6$ respectivamente (ver Tabla 6.3) y los ángulos θ donde hubo conexión con las cuatro anclas incluyendo aquella con condiciones de NLOS. En estas tablas se puede observar que los errores en la medición de distancia no son especialmente grandes en términos de la media μ_{NLOS} pero sí respecto a la desviación estándar σ_{NLOS} . Sin embargo, comparando los valores de RMSE del algoritmo RA-GN con los mostrados en las Tablas 6.5-6.9 no se muestra una gran diferencia en la precisión obtenida en la mayoría de los casos pero sí termina empeorando por unos cuantos centímetros.

θ (grados)	$RMSE_1$ (cm)	$RMSE_2$ (cm)	Δ_{RMSE} (cm)	ρ (%)	μ_{NLOS} (cm)	σ_{NLOS} (cm)
60	26.7	8.2	18.5	24.16	15.15	38.92
80	28.9	7.1	21.8	98.50	14.48	38.05
100	12.1	8.7	3.4	98.16	13.87	37.25
120	40.6	6.8	33.8	1.66	11.52	33.95
280	14.4	11.1	3.3	98.5	13.31	36.49
300	14.1	9.6	4.5	99.5	15.38	39.21
320	20.8	8	12.8	99.33	18.87	43.44
340	18.3	7.2	11.1	98.5	18.73	43.28
			$\Delta\mu = 13.65$			

Tabla 6.11: RMSE obtenido en la posición (-4.6, 2.05) usando cuatro anclas.

θ (grados)	$RMSE_1$ (cm)	$RMSE_2$ (cm)	Δ_{RMSE} (cm)	ρ (%)	μ_{NLOS} (cm)	σ_{NLOS} (cm)
0	15.9	8.2	7.7	39.5	4.83	21.97
80	-	-	-	6.33	5.46	23.36
120	13.3	4.7	8.6	96.66	5.37	23.17
140	15.2	4.6	10.6	90.33	2.97	17.22
160	13.3	3	10.3	99.83	8	28.29
180	13.4	4.7	8.7	99.67	9.51	30.84
200	14.5	4.4	10.1	99.67	12.01	34.65
240	10.8	3.8	7	84.83	3.70	19.23
260	10.4	4.2	6.2	99	6.31	25.12
280	10.8	3.6	7.2	99.83	5.12	22.62
320	14.4	5.3	9.1	99.17	4.46	21.11
340	17.5	4.8	12.7	98.17	3.85	19.63
			$\Delta\mu = 8.92$			

Tabla 6.12: RMSE obtenido en la posición (7,0) usando cuatro anclas.

θ (grados)	$RMSE_1$ (cm)	$RMSE_2$ (cm)	Δ_{RMSE} (cm)	ρ (%)	μ_{NLOS} (cm)	σ_{NLOS} (cm)
60	15.3	12.3	3	3	24.47	49.47
80	30.5	26.8	3.7	98.67	22.86	47.81
100	11.9	10.7	1.2	97.83	25.22	50.22
120	5.5	3.3	2.2	21.17	17.90	42.30
160	16.6	3.3	13.3	72.33	29.83	54.61
220	14.7	12.5	2.2	2.33	27.62	52.56
240	7.7	6.3	1.4	54.67	21.43	46.29
			$\Delta\mu = 3.85$			

Tabla 6.13: RMSE obtenido en la posición (3,-2.5) usando cuatro anclas.

θ (grados)	$RMSE_1$ (cm)	$RMSE_2$ (cm)	Δ_{RMSE} (cm)	ρ (%)	μ_{NLOS} (cm)	σ_{NLOS} (cm)
0	182.8	132.6	50.2	99.5	7.13	26.70
20	19	12.1	6.9	98.83	8.74	29.57
40	18.7	12.1	6.6	83.5	14.19	37.67
60	21.3	10.8	10.5	99	11.23	33.51
80	17.5	10.5	7	99.83	3.87	19.67
100	16.4	6.8	9.6	90.33	2.93	17.11
180	-	-	-	3.67	4.42	21.03
280	11.9	11.9	0	86.67	28.03	52.94
300	19.4	15.2	4.2	99.67	3.10	17.61
320	19.9	11.2	8.7	99.33	2.83	16.83
340	14.9	13.1	1.8	99.33	2.58	16.07
			$\Delta\mu = 10.55$			

Tabla 6.14: RMSE obtenido en la posición (-3.35,-4) usando cuatro anclas.

θ (grados)	$RMSE_1$ (cm)	$RMSE_2$ (cm)	Δ_{RMSE} (cm)	ρ (%)	μ_{NLOS} (cm)	σ_{NLOS} (cm)
0	14.3	11.6	2.7	99.67	6.33	25.16
40	14.3	11.1	3.2	97.5	5.28	22.98
60	-	-	-	89.83	8.83	22.90
80	-	-	-	86	13.5	21.25
120	13.2	8.6	4.6	99.3	4.34	20.83
140	9.8	7.3	2.5	98.83	6.81	26.09
320	-	-	-	54.83	8.05	23.38
340	14.9	9.9	5	99.67	10.51	32.42
			$\Delta\mu = 3.6$			

Tabla 6.15: RMSE obtenido en la posición (-4,-7) usando cuatro anclas.

Con el fin de resumir los resultados obtenido se presentan dos gráficas de barras donde se aprecian el número de veces N_T en que el desempeño obtenido tanto por el algoritmo RA-GN ó el DRTLS resultaron ser mejores en términos de RMSE. En la Figura 6.6 se observa que de un total de 77 casos solo en una ocasión el DRTLS resultó ser mejor que el algoritmo RA-GN, es decir que al estimar con solo 3 anclas un 98.7 % de las veces el algoritmo RA-GN logró mejorar la estimación dada por el DRTLS. Por otro lado, en la Figura 6.7 se muestra que de un total de 53 casos analizados para el uso de 4 anclas, en 50 ocasiones el algoritmo RA-GN obtuvo un mejor rendimiento, en 2 ocasiones el rendimiento del DRTLS fue mejor y en una ocasión ambos rendimientos fueron iguales. Por lo tanto para la estimación con anclas se puede decir que en un 94.33 % de las veces el desempeño obtenido por el algoritmo RA-GN fue mejor.

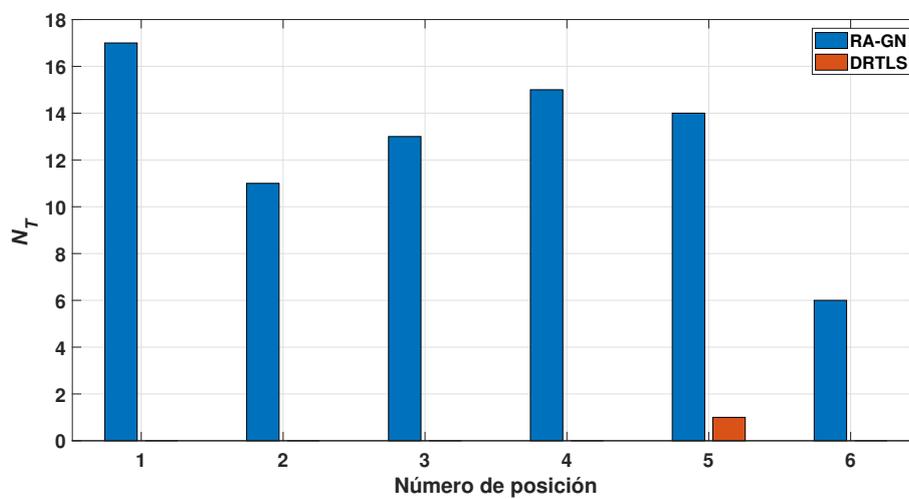


Figura 6.6: Representación grafica del desempeño obtenido entre el algoritmo RA-GN y el DRTLS para el caso de 3 anclas.

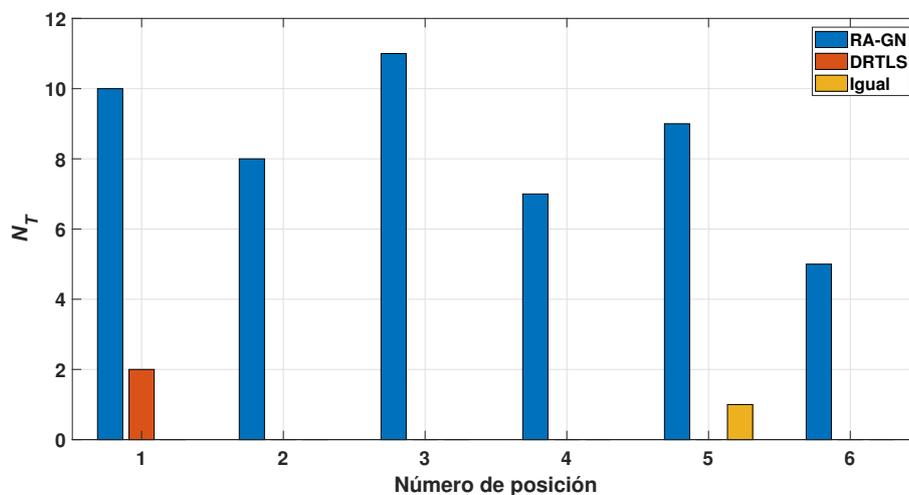


Figura 6.7: Representación grafica del desempeño obtenido entre el algoritmo RA-GN y el DRTLS para el caso de 4 anclas.

Por último en la tabla 6.16 se muestran los valores $\Delta\mu$ obtenidos en cada una de las posiciones analizadas, es posible observar que a excepción de la posición 1 para 4 anclas todos los demás valores de $\Delta\mu$ son positivos, es decir, el RMSE obtenido por el algoritmo RA-GN es menor al del DRTLS. Por otro lado, la ganancia que se puede lograr al utilizar el algoritmo RA-GN va desde los 3 cm hasta los 18 cm en el mejor caso.

Número de posición	3 anclas $\Delta\mu$ (cm)	4 anclas $\Delta\mu$ (cm)
1	3.95	-4.82
2	18.34	13.65
3	8.66	8.92
4	3.06	3.85
5	14.08	10.55
6	4.75	3.60

Tabla 6.16: Valores de $\Delta\mu$ obtenidos en cada posición.

Conclusiones

Como se ha establecido en este trabajo, el tema de localización es de gran importancia para la navegación autónoma de robots móviles, principalmente para los UAVs debido a que tener información con precisión de su posición hace posible el cumplimiento de sus misiones. A pesar de que hoy en día es posible determinar la posición de los UAVs cuando vuelan a grandes alturas o en su defecto en zonas de interiores totalmente controladas, donde se conocen todos los factores que influyen dentro de ese ambiente, existen zonas donde volar estos vehículos sigue siendo complicado. Esta problemática llevó a realizar el proyecto de doctorado descrito a lo largo de esta tesis, de donde, con la finalidad de proponer una posible solución, se estudiaron diversos temas desprendiéndose diferentes conclusiones las cuales se puntualizan a continuación.

7.1. Tecnología de UWB para localización

En este trabajo se realizó un estudio exhaustivo acerca de la tecnología de UWB para propósitos de localización debido a que ofrece una mayor precisión, alrededor de una decena de centímetros, comparada a la que ofrecen otros sistemas de localización. A pesar de que estos sistemas están especialmente diseñados para zonas de interiores, en este trabajo de tesis se evaluó su desempeño para propósitos de navegación de UAVs en ambientes suburbanos, pero resulta que para este tipo de aplicaciones y ambientes los sistemas de localización por UWB tienen dos principales desventajas; su corto alcance, alrededor de 20 m, y la necesidad de utilizar sistemas con redundancia (varias estaciones base o anclas) para mejorar la precisión en la estimación de posición. Esta es la razón por la que actualmente no suelen implementarse para la navegación de áreas de extenso tamaño, sin embargo, tanto la precisión, el bajo gasto energético y los bajos costos de estos sistemas motivaron a desarrollar dentro de este trabajo de tesis una estrategia en la cual se pudieran utilizar las ventajas que ofrece respecto a otros sistemas mientras se contrarrestan las desventajas mencionadas.

7.2. Macro-diversidad

Ya que los ambientes sub-urbanos son el objeto de estudio en este trabajo de tesis debido a la complejidad que agregan a la navegación autónoma, se verificó la eficiencia que podrían llegar a ofrecer los sistemas de localización en este tipo de ambientes. Se utilizó el concepto de macro-diversidad para visualizar la cantidad de anclas requeridas para asegurar un vuelo

autónomo en cuatro ambientes semi boscosos con diferentes niveles de densidad de árboles, ya que esto limita el alcance de la señal para sistemas de radiofrecuencia debido a los efectos de ensombrecimiento y de trayectorias múltiples, lo cual no es excepción para los sistemas de UWB. Como resultado de las simulaciones, se logró observar que se requiere un gran número de anclas para navegar en ambientes con gran cantidad de obstáculos, en este caso árboles, demostrado lo poco eficiente y costoso que puede llegar a ser el utilizar este tipo de sistemas en ambientes suburbanos. Como consecuencia, en este trabajo de tesis se propuso como objetivo el proponer una estrategia capaz de contrarrestar las desventajas de estos sistemas.

7.3. Métodos de posicionamiento

Uno de los aspectos más importantes para los sistemas de localización son los métodos con los que se determina la posición a partir de la información dada por las anclas. En este trabajo de tesis se estudiaron algunos de los métodos de posicionamiento más usados en la literatura y se compararon en términos de precisión, donde fue posible observar que los métodos de ejes radicales y de Gauss-Newton demostraron tener los mejores resultados para sistemas redundantes a pesar de contar con distintas características, por lo que fueron tomados en cuenta para desarrollar y proponer en este trabajo de tesis un nuevo algoritmo de posicionamiento.

7.4. Vuelo en formación

Debido a que los sistemas de localización por UWB requieren del conocimiento de las posiciones de las anclas, se hace casi imposible la navegación en zonas desconocidas. Para compensar este problema, en esta tesis se propuso una estrategia que utiliza un mayor número de vehículos, por lo que fue necesario definir una estrategia para el vuelo en formación. Aunque pueden existir estrategias más eficientes y complejas como el uso de formaciones dinámicas, se eligió la estructura virtual debido a su simplicidad y que este tipo de estrategia le da el mismo valor a cada uno de los vehículos a diferencia de un líder-seguidor.

7.5. Contribuciones originales

7.5.1. Algoritmo RA-GN

A partir de los estudios realizados se propuso un nuevo algoritmo de posicionamiento nombrado RA-GN debido a que está basado en los métodos de ejes radicales (RA por sus siglas en inglés) y Gauss-Newton (GN). El algoritmo RA-GN es capaz de encontrar la posición donde los errores se minimizan a pesar de contar con la mínima cantidad de información proporcionada por sistemas sin redundancia. La precisión del algoritmo RA-GN es puesta a prueba de forma experimental bajo condiciones reales en un zona semi-boscosa con múltiples obstáculos y comparado con un sistema de localización comercial ampliamente utilizado hoy en día tanto para fines de investigación como en la industria. Los resultados obtenidos demuestran un disminución del error con una magnitud desde 3 cm hasta 18 cm para un 98.7 % de los casos utilizando la información de solo 3 anclas y un 94.3 % al utilizar 4 anclas, con lo

que se demuestra las ventajas de utilizar el algoritmo propuesto en este trabajo de tesis.

7.5.2. Estrategia de navegación

Por otro lado, se logró demostrar por medio de simulaciones que el algoritmo RA-GN también tiene la capacidad de ayudar en la navegación autónoma de UAVs utilizando la estrategia presentada en este trabajo de tesis. Combinando el vuelo en formación de al menos 3 UAVs y la precisión proporcionada por el algoritmo RA-GN es posible navegar dentro de zonas desconocidas y con múltiples obstáculos contrarrestando las desventajas propias de este tipo de sistemas.

7.6. Trabajo futuro

Una vez demostrada la precisión que es capaz de lograr el algoritmo RA-GN, existe una gran gama de posibles aplicaciones para este algoritmo y aunque en el alcance de este trabajo de tesis se logró demostrar por medio de simulaciones su uso en la navegación de UAVs dentro de zonas desconocidas y con múltiples obstáculos, aún es necesario realizar un extenso trabajo para llevarlo a la práctica ya que la localización es sólo uno de los puntos necesarios para la navegación autónoma en zonas con alta densidad de obstáculos. Dentro del trabajo requerido para lograr una navegación totalmente autónoma dentro de zonas suburbanas se encuentran los siguientes puntos:

- a) Proponer y/o diseñar un mecanismo de liberación de anclas que pueda implementarse en cada uno de los vehículos.
 - b) Agregar estrategias para la evasión de obstáculos.
 - c) Debido a la densidad de obstáculos que se puede esperar dentro de las zonas de interés no es posible asegurar que los vehículos puedan desplazarse siempre con un misma formación por lo que es necesario optar por implementar estrategias de vuelo en formaciones dinámicas.
 - d) Explorar la posibilidad de implementar algoritmos de aprendizaje automático (*machine learning*) para la generación de trayectorias en ambientes dinámicos.
 - e) Revisar la correlación que tiene la dinámica del vehículo con el fenómeno de ensombrecimiento.
-

Bandas de frecuencia

Con el fin de administrar el espectro radioeléctrico, medio natural por el que se transmiten las ondas de radiofrecuencia, se divide en las llamadas bandas de frecuencia las cuales son mostradas en la Tabla A.1 [54].

Designación de bandas de frecuencias		
Bandas de frecuencia	Intervalo de frecuencia	Longitud de onda
Very low frequency (VLF)	3-30 kHz	100 km - 10 km (Miriamétrico)
Low frequency (LF)	30-300 kHz	10 km - 1 km (Kilométrico)
Medium frequency (MF)	300 kHz-3 MHz	1 km - 100 m (Hectométrico)
High frequency (HF)	3-30 MHz	100 m - 10 m (Decamétrico)
Very high frequency (VHF)	30-300 MHz	10 m - 1 m (Métrico)
Ultra high frequency (UHF)	300 MHz- 3 GHz	1 m- 10 cm (Decimétrico)
Super high frequency (SHF)	3-30 GHz	10 cm - 1 cm (Centimétrico)
Extra high frequency (EHF)	30-300 GHz	1 cm - 1 mm (Milimétrico)

Tabla A.1: Designación de bandas de frecuencias

A continuación se definen cada una de las bandas de frecuencia mencionadas en la tabla anterior.

VLF: las frecuencias radioeléctricas VLF tienen como principal característica su gran longitud de onda la cual permite comunicaciones a largas distancias, comúnmente viajando en las capas más bajas de la atmósfera, sin embargo, su ancho de banda resulta bastante bajo lo cual limita enormemente la transmisión de datos a altas velocidades. Esta banda de frecuencias es utilizada normalmente para generar enlaces de comunicación con submarinos ya que su gran longitud de onda permite una menor atenuación de la señal al viajar hacia las profundidades del océano. La base Palmer ubicada en la isla Anvers en el círculo polar antártico utiliza estas frecuencias [55].

LF y MF: Son las frecuencias que se encuentran entre unas decenas de kHz y unos cuantos MHz, por lo general su propagación es por ondas de superficie o *groundwave*, es decir, las ondas viajan muy cerca de la superficies terrestre, aunque durante la noche existe la posibilidad de generarse una segunda señal tipo *skywave* lo cual produce una interferencia al haber dos señales las cuales llegan al mismo punto por diferentes trayectorias, fenómeno conocido

como *desvanecimiento de señales* el cual se describirá más adelante. Suelen utilizarse para radiodifusión AM comerciales con un alcance de cientos de millas.

HF: Aunque también existen ondas de superficie en la propagación dentro de este intervalo de frecuencias suelen transmitirse por la ionosfera. Hoy en día esta banda de frecuencias es utilizada tanto para aplicaciones comerciales como militares [56], cabe destacar que estas ondas al ser capaces de viajar a través de varias capas de la ionosfera, les permite viajar al rededor de la curvatura de la tierra logrando así comunicaciones transcontinentales.

VHF y UHF: Estas bandas de frecuencia tienden a ser demasiado altas para propagarse por la ionosfera, sin embargo, suelen presentar los mecanismos de propagación por trayectoria directa y trayectorias reflejadas por la tierra. En estas bandas de frecuencias, las antenas suelen ser relativamente pequeñas y suelen ser montadas en mástiles a unos cuantas longitudes de onda por encima de la superficie. Gracias al ancho de banda disponible, las transmisiones por radio FM y televisión están colocadas en este intervalo de frecuencias además de considerarse las más adecuadas para las comunicaciones móviles. Es necesario tener en cuenta los problemas de propagación ocurridas por la reflexión de la señal por obstáculos tanto naturales como hechos por el hombre, además de las refracciones de la atmósfera y difracciones ocurridas por montañas y edificios.

SHF: Las llamadas *microondas* son parte de esta banda de frecuencia. Debe existir una línea de vista (LOS, *Line of sight*) entre la antena de transmisión y recepción ya que de lo contrario habrá grandes pérdidas en la transmisión de la señal. Esta banda de frecuencias se suelen utilizar para comunicaciones satelitales, radares y sistemas de comunicación a corto alcance.

EHF: El uso de ondas milimétricas es la principal característica en esta banda de frecuencias. Además de que cuenta con un enorme ancho de banda se puede decir que en estas frecuencias las ondas reflejadas por tierra dejan de ser un verdadero problema debido a su pequeña longitud de onda ya que se considera que las irregularidades del terreno suelen ser mucho más grandes, por lo que los desvanecimientos por multitrayecto casi no suelen presentarse. Sin embargo, presenta problemas como la dispersión debido a las precipitaciones, es decir, en caso de lluvia o nieve, y absorción por neblina o vapor de agua. Por tal motivo, sus principales aplicaciones son la comunicación entre satélites y comunicaciones de seguridad a muy corto alcance.

Mecanismos de propagación

Como se mencionó en el Capítulo 1, una de las características de las bandas de frecuencia VHF y UHF es que son susceptibles a los fenómenos físicos de reflexión, refracción y difracción por los obstáculos en el canal. Para entender esto, a continuación se detallarán estos fenómenos para una mejor comprensión [3].

Reflexión: El fenómeno de reflexión se presenta cuando una onda electromagnética cambia totalmente de dirección debido a la interacción con un objeto el cual es incapaz de traspasar (debido a que el objeto resulta más grande que su longitud de onda), provocando que la onda regrese al medio de origen.

Refracción: Se define como el cambio de dirección de un onda producido al pasar a través de un medio a otro con un índice de refracción diferente. Para dos medios con diferentes índices de refracción, el ángulo de refracción con el que sale la onda puede aproximarse por la Ley de Snell, la cual establece

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (\text{B.1})$$

donde n_1 es el índice de refracción del medio por el cual la onda se propaga, θ_1 es el ángulo de incidencia respecto al eje de refracción (considerado la superficie de separación entre dos medios de distintas propiedades); n_2 es el índice de refracción del medio por el cual la onda refractada viaja y θ_2 es el ángulo respecto al eje de refracción en el que la onda sale refractada.

Difracción: Cuando una onda llega a un obstáculo o abertura con dimensiones parecidas a la longitud de onda, éste se convierte en un nuevo foco emisor. Mientras más parecida sea la longitud de onda respecto al tamaño del obstáculo o abertura, mayor será la energía difractada. Así básicamente la difracción se refiere a un cambio de dirección de la onda transmitida de tal forma que hay un aparente doblamiento de ésta al rededor de un objeto. Este fenómeno se presenta principalmente en fillos y bordes.

Atenuación: Se puede definir la atenuación de un onda como la disminución en la intensidad de la señal a medida que se aleja del foco. Se debe exclusivamente a la dispersión de su energía entre una superficie cada vez mayor.

La atenuación de una onda esférica provoca que la intensidad de sus frentes de onda sea inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que se encuentran del foco, esto puede resumirse en la siguiente relación.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (\text{B.2})$$

donde I_1 representa la intensidad de la señal en el frente de onda a una distancia r_1 , mientras que I_2 es la intensidad de la señal a una distancia r_2 .

Absorción: Se define como el fenómeno por el cual la intensidad de la señal disminuye debido a los efectos disipativos del medio de propagación, provocando la reducción de la energía que transportan. En la Figura B.1 la línea punteada de color rojo representa la envolvente de la señal, a partir de los valores de elongación máxima A_1 y A_2 real que alcanza la onda conforme se aleja del foco a las distancias x_1 y x_2 . Por otro lado, la línea punteada verde representa el valor teórico si solo se consideran los efectos de la atenuación. Por lo tanto, la diferencia entre el valor real y el valor esperado se explica por el fenómeno de la absorción.

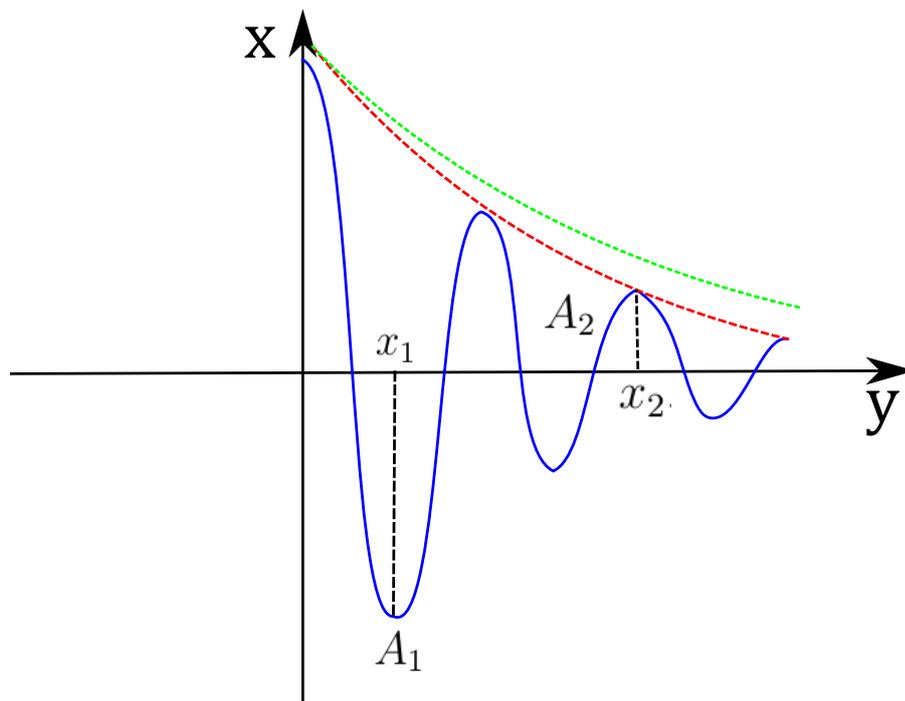


Figura B.1: Representación del fenómeno de atenuación y absorción [4]

Preparación y configuración del DRTLS

Los módulos DWM1001 que utilizan tecnología UWB de marca Decawave permiten la fácil implementación de un sistema de localización en tiempo real desarrollado por la misma marca, el DRTLS. Cada módulo tiene la capacidad de ser configurado como ancla o nodo etiqueta vía Bluetooth usando la aplicación Decawave DRTLS Manager [19] o conectado a una computadora utilizando un emulador de terminal, por ejemplo Tera Term.

C.1. Configuración de las anclas y el nodo etiqueta

- Seleccionar algunos módulos como anclas, mínimo 3 para propósitos de localización pero se recomiendan 4 para mejor precisión.
- Montar las anclas en la pared o usando tripiés.
- Alimentar las anclas utilizando baterías o conectores USB.
- Seleccionar una de las anclas como iniciador. Será aquel que comience y controle la red.
- Agregar a la red las posiciones de cada ancla o en su defecto usar la opción de auto posicionamiento.
- Seleccionar al menos un módulo como nodo etiqueta y un máximo de 15 para una misma red.
- Alimentar los nodos etiquetas con baterías.
- Configurar la velocidad de actualización, la velocidad por omisión es de 10 mediciones por segundo.
- Comenzar la localización en tiempo real de los nodos etiquetas. Todas las mediciones serán guardadas en un Log el cual podrá ser descargado para ser analizado.

C.2. Ejemplos de diferentes configuraciones del DRTLS

- 1 Anclas + 1 nodo etiqueta: esta configuración sirve principalmente para medir distancias entre la ancla y el nodo etiqueta.
 - 4 anclas + 8 nodos etiquetas: Esta configuración de RTLS utiliza el mínimo número de anclas recomendadas para localizar varios nodos a la vez. Sin embargo, el área de localización está limitado al alcance de las anclas.
 - 11 anclas + 1 nodo etiqueta: En esta configuración se realiza la localización de un solo nodo pero es posible ampliar el área de localización al distribuir un mayor número de anclas.
-

Artículos publicados de esta tesis

-Luis A. Arellano-Cruz, Giselle M. Galvan-Tejada, and Rogelio Lozano-Leal. Performance Comparison of Positioning Algorithms for UAV Navigation Purposes based on Estimated Distances. In *2020 17th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, pages 1-8, 2020, doi: 10.1109/CCE50788.2020.9299342.

-Luis A. Arellano-Cruz, Giselle M. Galvan-Tejada and Rogelio Lozano-Leal. A New Positioning Algorithm Robust to Measured Distances Errors for Non-Overdetermined Systems. In *2021 18th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, pages 1-4, 2021, doi: 10.1109/CCE53527.2021.9633061.

-Luis A. Arellano-Cruz, Giselle M. Galvan-Tejada and Rogelio Lozano. Position Estimation using the Radical Axis Gauss Newton Algorithm: Experimental Analysis. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 107(2), 2023.

Referencias

- [1] Ali Yassin, Youssef Nasser, Mariette Awad, Ahmed Al-Dubai, Ran Liu, Chau Yuen, Ronald Raulefs, and Elias Aboutanios. Recent advances in indoor localization: A survey on theoretical approaches and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2):1327–1346, 2016.
- [2] Guoqiang Mao, Barış Fidan, and Brian Anderson. Wireless sensor network localization techniques. *Computer networks*, 51(10):2529–2553, 2007.
- [3] Mohammad Ghavami, Lachlan Michael, and Ryuji Kohno. *Ultra wideband signals and systems in communication engineering*. John Wiley & Sons, 2007.
- [4] José L Fernández. Fisicalab. url <https://www.fisicalab.com/apartado/amortiguacion/contenidos>. accessed: 2015-11-15.
- [5] Enrique López Lara, Carlos Posada Simeón, and Jesús Gabriel Moreno Navarro. Los sistemas de información geográfica. *Geoenseñanza*, 11:16, 2006.
- [6] Nicoletta Lanciano. Ver y hablar como Tolomeo y pensar como Copérnico. *Enseñanza de las ciencias: Revista de investigación y experiencias didácticas*, 7(2):173–182, 1989.
- [7] Robert Alexander Watson-Watt. *Three steps to victory*. Odhams Press., 1957.
- [8] W. F. Blanchard. Air navigation systems chapter 4. hyperbolic airborne radio navigation aids. a navigator’s view of their history and development. *The Journal of Navigation*, 44(3):285–315, 1991.
- [9] Gifford Hefley. *The development of Loran-C navigation and timing*, volume 129. National Bureau of Standards, 1972.
- [10] David Wells, Demitris Delikaraoglou, and Petr Vanic. Marine navigation with NAVSTAR/Global Positioning System (GPS) today and in the future. *The Canadian Surveyor*, 36(1):9–28, 1982.
- [11] Janilys Roman, David Marquez-Viloria, Ricardo Velásquez, and Juan Botero-Valencia. Sistema de posicionamiento en interiores utilizando señales de radio estaciones FM comerciales y Deep Learning. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 17(1):34–43, 2020.

-
- [12] Sinan Gezici, Zhi Tian, Georgios B Giannakis, Hisashi Kobayashi, Andreas F Molisch, H Vincent Poor, and Zafer Sahinoglu. Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks. *IEEE signal processing magazine*, 22(4):70–84, 2005.
- [13] John David Parsons. *The mobile radio propagation channel*. Pentech Press London, 1992.
- [14] <https://xbee.cl>. accessed: 2015-12-06.
- [15] Theodore S Rappaport et al. *Wireless communications: principles and practice*, volume 2. Prentice Hall, 1996.
- [16] Manlio Bacco, Erina Ferro, and Alberto Gotta. UAVs in WSNs for agricultural applications: An analysis of the two-ray radio propagation model. *IEEE Sensors*, pages 130–133, 2014.
- [17] Daniel Minoli and Benedict Occhiogrosso. Ultrawideband (UWB) Technology For Smart Cities IoT Applications. In *2018 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, pages 1–8, 2018.
- [18] J del Prado Pavon, N Shankar, Vasanth Gaddam, K Challapali, and Chun-Ting Chou. The MBOA-WiMedia specification for ultra wideband distributed networks. *IEEE Communications Magazine*, 44(6):128–134, 2006.
- [19] <https://www.decawave.com/product/dwm1000-module/>. Accessed: 2022-06-09.
- [20] Mohamed Laaraiedh, Stéphane Avrillon, and Bernard Uguen. Cramer–Rao lower bounds for nonhybrid and hybrid localisation techniques in wireless networks. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 23(3):268–280, 2012.
- [21] Danwei Wang, Ramprashanth Kannan, Liu Wei, and Bertrand Tay. Time of flight based two way ranging for real time locating systems. In *2010 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, pages 199–205. IEEE, 2010.
- [22] Bertrand T Fang et al. Simple solutions for hyperbolic and related position fixes. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 26(5):748–753, 1990.
- [23] Emre Teoman and Tolga Ovatman. Trilateration in Indoor Positioning with an Uncertain Reference Point. In *2019 IEEE 16th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, pages 397–402, 2019.
- [24] Pablo Cotera, Miguel Velazquez, David Cruz, Luis Medina, and Manuel Bandala. Indoor robot positioning using an enhanced trilateration algorithm. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 13(3):110, 2016.
- [25] Ho Chiung Ching and Lee Kian Chin. Location approximation of a wireless device in a wireless local area network. In *2008 International Symposium on Information Technology*, volume 4, pages 1–5. IEEE, 2008.
-

-
- [26] Safar M Asaad and Halgurd S Maghdid. A Comprehensive Review of Indoor/Outdoor Localization Solutions in IoT era: Research Challenges and Future Perspectives. *Computer Networks*, 2022.
- [27] Song Chai, Renbo An, and Zhengzhong Du. An indoor positioning algorithm using bluetooth low energy RSSI. In *2016 International Conference on Advanced Materials Science and Environmental Engineering*, pages 274–276. Atlantis Press, 2016.
- [28] Ian Oppermann, Matti Hämäläinen, and Jari Iinatti. *UWB: theory and applications*. John Wiley & Sons, 2005.
- [29] Wen Huey Lai, Sie Long Kek, and Kim Gaik Tay. Solving nonlinear least squares problem using Gauss-Newton method. *Int. J. Innovative Sci. Eng. Technol.*, 4:258–262, 2017.
- [30] Richard J Rossi. *Mathematical statistics: an introduction to likelihood based inference*. John Wiley & Sons, 2018.
- [31] David Munoz-Rodriguez, L Suarez-Robles, C Vargas-Rosales, and JR Rodriguez-Cruz. Maximum likelihood position location with a limited number of references. *Journal of Applied Research and Technology*, 9(1):5–18, 2011.
- [32] Imtiaz Rasool and Andrew H Kemp. Statistical analysis of wireless sensor network Gaussian range estimation errors. *IET Wireless Sensor Systems*, 3(1):57–68, 2013.
- [33] L Stirling Churchman, Henrik Flyvbjerg, and James A Spudich. A non-Gaussian distribution quantifies distances measured with fluorescence localization techniques. *Biophysical Journal*, 90(2):668–671, 2006.
- [34] Jing Xu, Jingsha He, Yuqiang Zhang, Fei Xu, and Fangbo Cai. A distance-based maximum likelihood estimation method for sensor localization in wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(4), 2016.
- [35] Charles H Lehmann. *Geometría analítica*. Limusa, 1965.
- [36] João Carlos Alves Barata and Mahir Saleh Hussein. The Moore–Penrose pseudoinverse: A tutorial review of the theory. *Brazilian Journal of Physics*, 42(1):146–165, 2012.
- [37] Luis A Arellano-Cruz, Giselle M Galvan-Tejada, and Rogelio Lozano-Leal. Performance comparison of positioning algorithms for UAV navigation purposes based on estimated distances. In *2020 17th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, pages 1–8, 2020.
- [38] GL Turin, FD Clapp, TL Johnston, SB Fine, and D Lavry. A statistical model of urban multipath propagation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 21(1):1–9, 1972.
- [39] Aziz Altaf Khuwaja, Yunfei Chen, Nan Zhao, Mohamed-Slim Alouini, and Paul Dobbins. A survey of channel modeling for UAV communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(4):2804–2821, 2018.
-

-
- [40] I Ouachani, P Duhamel, K Gosse, S Rouquette-Leveil, and D Bateman. Macro-diversity versus micro-diversity system capacity with realistic receiver RFFE model. In *IEEE 6th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, 2005.*, pages 865–869, 2005.
- [41] Haejoon Jung and In-Ho Lee. Performance analysis of millimeter-wave UAV swarm networks under blockage effects. *Sensors*, 20(16), 2020.
- [42] Michael C Batistatos, Georgia E Athanasiadou, Dimitra A Zarbouti, George V Tsoulos, and Nikos C Sagias. LTE ground-to-air measurements for UAV-assisted cellular networks. In *12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018)*, pages 1–5, 2018.
- [43] CR Anderson, HI Volos, WC Headley, FC Muller, and RM Buehrer. Low antenna ultra wideband propagation measurements and modeling in a forest environment. In *2008 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pages 1229–1234, 2008.
- [44] Wahab Khawaja, Ismail Guvenc, and David Matolak. UWB channel sounding and modeling for UAV air-to-ground propagation channels. In *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–7, 2016.
- [45] K Edgerton, G Throneberry, A Takeshita, CM Hocut, F Shu, and A Abdelkefi. Numerical and experimental comparative performance analysis of emerging spherical-caged drones. *Aerospace Science and Technology*, 95, 2019.
- [46] Ahmed Borik, Alif Kallangodan, Wisam Farhat, Arwa Abougharib, Mohammad A Jaradat, Shayok Mukhopadhyay, and Mamoun Abdel-Hafez. Caged quadrotor drone for inspection of central HVAC ducts. In *2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, pages 1–7. IEEE, 2019.
- [47] Frank L Lewis, Hongwei Zhang, Kristian Hengster-Movric, and Abhijit Das. *Cooperative control of multi-agent systems: optimal and adaptive design approaches*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [48] Yi Liu, Junyao Gao, Cunqiu Liu, Fangzhou Zhao, and Jingchao Zhao. Reconfigurable formation control of multi-agents using virtual linkage approach. *Applied Sciences*, 8(7):1109, 2018.
- [49] Vladimir Igorevich Arnol'd. *Mathematical methods of classical mechanics*, volume 60. Springer Science & Business Media, 2013.
- [50] M Anthony Lewis and Kar-Han Tan. High precision formation control of mobile robots using virtual structures. *Autonomous robots*, 4(4):387–403, 1997.
- [51] Richard S Hamilton. The inverse function theorem of Nash and Moser. *Bulletin (New Series) of the American Mathematical Society*, 7(1):65–222, 1982.
- [52] Shaohua Wu, Yongkui Ma, Qinyu Zhang, and Naitong Zhang. NLOS error mitigation for UWB ranging in dense multipath environments. In *2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pages 1565–1570. IEEE, 2007.
-

-
- [53] Pedro Castillo Garcia, Rogelio Lozano, and Alejandro Enrique Dzul. *Modelling and control of mini-flying machines*. Springer Science & Business Media, 2005.
- [54] Mark Holker. Radiowave propagation. In *Telecommunications Engineer's Reference Book*, pages 27–47. Elsevier, 1993.
- [55] William B Peter, MW Chevalier, and Umran S Inan. Perturbations of midlatitude subionospheric VLF signals associated with lower ionospheric disturbances during major geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 111(A3), 2006.
- [56] Nicholas Maslin. *HF communications*. Pitman London, 1987.
- [57] Kenichiro Takahashi, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori, Hiroshi Kobayashi, and Akira Nishizawa. Modeling of propeller electric airplane and thrust control using advantage of electric motor. In *2014 IEEE 13th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)*, pages 482–487, 2014.
- [58] Ahmed S Yousif and Ammar S Mohammed. Analysis and simulation of unmanned aircraft propeller motor using psim. *Engineering and Technology Journal*, 36(10):1081–1090, 2018.
- [59] Ivan Grujic and René Nilsson. Model-based development and evaluation of control for complex multi-domain systems: Attitude control for a quadrotor uav. *Technical Report Electronics and Computer Engineering*, 4(23), 2016.
-