



Disertación

Maestría en Ingeniería Informática – Computación Móvil

***Sistema de Localización Indoor y Outdoor para un
Mini Vehículo Aéreo Autónomo No Tripulado
utilizando Módulos Wi-Fi***

*(Sistema de localização indoors e outdoors para um mini veículo
aéreo autónomo não tripulado utilizando módulos
Wi-Fi)*

Daniela Katherine Flores Taipe

Leiria, Octubre 2017



Disertación

Maestría en Ingeniería Informática – Computación Móvil

***Sistema de Localización Indoor y Outdoor para un
Mini Vehículo Aéreo Autónomo No Tripulado
utilizando Módulos Wi-Fi***

*(Sistema de localização indoors e outdoors para um mini veículo
aéreo autónomo não tripulado utilizando módulos
Wi-Fi)*

Daniela Katherine Flores Taipe

Tesis de Maestría dirigido por el Profesor Dr. João da Silva Pereira, Docente en la Escuela de Tecnología y Gestión del Instituto Politécnico de Leiria y co-dirigido por el Profesor Dr. Diego Marcillo, Maestro en el Departamento Ciencias de la Computación en la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

Leiria, Octubre 2017

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada a Dios y a la Virgen María que han bendecido mi camino con su presencia, para concluir con esta etapa de mi carrera.

A mis padres Elvia Taipe y Ramón Flores, por estar siempre a mi lado, por convertirse en apoyo incondicional y brindarme consejos para continuar con mis sueños.

Y a mis segundos papitos que desde el cielo se han convertido en mi compañía y que desde allá cuidan y guían de mí.

“Sigo avanzando hacia la meta para ganar el premio que Dios ofrece mediante su llamamiento celestial en Cristo Jesús.” Filipenses 3:14

Daniela Katherine Flores T.

Agradecimientos

La vida es una constante batalla que cuenta con momentos altos y bajos; cada paso que damos encontramos a personas, a lugares y a instituciones que marcan nuestro destino y a pesar del tiempo estas quedarán como grandes memorias y recuerdos que nos forjan como persona.

Primero doy gracias a Dios por haberme permitido estudiar en el Instituto Politécnico de Leiria, gracias a esta Institución por darme la oportunidad de aprender y conocer nuevos conocimientos, además de presentarme su apoyo tanto material como moral.

Gracias a mi familia, sobre todo a mis padres Elvia y Ramón por su amor, tiempo, dedicación y paciencia que día a día me apoyaron y creyeron en mí, nunca me dejaron sola siempre me dieron toda palabra de apoyo.

A mis mentores de tesis Dr. João da Silva Pereira y Dr. Diego Marcillo que con su continuo apoyo y constante dedicación guiaron y brindaron su conocimiento para el desarrollo de esta tesis, con su ayuda y paciencia han hecho posible la culminación de este proyecto.

Quiero también expresar mi sincero agradecimiento a Rafael, por su paciencia y amor, porque a pesar de la distancia nunca dejo de apoyarme y darme palabras de aliento. Finalmente, gracias a todas aquellas personas que de una u otra manera han contribuido a esta culminación, de corazón gracias por todo.

Daniela Katherine Flores T.

Nota Previa

Del trabajo efectuado resultaron las siguientes publicaciones:

- Daniela Flores, Diego Marcillo, João Pereira. “3D Localization System for an Unmanned Mini Quadcopter based on Smart Indoor Wi-Fi Antennas”. WorldCIST’17-5th World Conference on Information Systems and Technologies. Publicada el 13 de Abril de 2017.
- Daniela Flores, Diego Marcillo, João Pereira. “3D Scanner Based on an Autonomous Wi-Fi Unmanned Mini Quadcopter”. WorldCIST’17-5th World Conference on Information Systems and Technologies. Publicada el 13 de Abril de 2017.

Resumen

Ante el constante desarrollo de la tecnología este ha dado origen a la demanda de aplicaciones, que precisan de más información del usuario, para la satisfacción de sus necesidades. La localización forma parte de tales necesidades, esto da lugar al avance de diferentes sistemas que reclaman precisión y rapidez en tiempo real, que sufren ciertas anomalías por el ruido, obstáculos, condiciones climáticas que provoca el sombreado, efecto multi-trayectoria y pérdida de la misma. El presente proyecto tiene como objetivo desarrollar un sistema de localización que considera el uso de módulos emisores y receptores que permiten mejorar el procesamiento y disminuir el consumo de energía, para optimar la estimación de posición en ambientes internos y externos en escenarios diferentes. Para llevar a cabo el diseño e implementación de este sistema sigue ciertas especificaciones de la metodología ciencia del diseño que da inicio a la construcción de nodos sensores inteligentes que modula y optimiza métodos de localización para el posicionamiento de un mini drone, que tiene como característica principal la navegación autónoma marcada por una ruta trazada. Se realizaron diferentes evaluaciones de estado (estático y dinámico) del UAV (Unmanned Aerial Vehicles, Vehículo Aéreo No Tripulado), en dos entornos diferentes cada uno con diferente magnitud, con los que se obtuvo el ángulo donde se encuentra la potencia máxima, y con ello el cálculo de error de precisión. Posteriormente se procede a interpretar cada uno de estos datos, determinando que el sistema de localización propuesto tiende a mejorar en cuanto a la estimación de localización y da opción a la modelación de un objeto o del ambiente en 3D o un medio fotográfico.

Palabras Claves:

Ambientes internos y externos, posicionamiento, radio frecuencia, Wi-Fi, antenas inteligentes, intensidad de señal recibida, antena Yagi, AoA, distancia euclíadiana, fotogrametría, ángulo, mini drone, UAV, autónoma, ESP8266-XX, ciencia del diseño.

Abstract

With the constant development in technology, this has originated in a high demand of applications, that need more information from the user to satisfy their necessities. Localization is part of such necessities. This, in place, leads to advances in different systems the reclaim precision and speed in real time, which suffer certain anomalies due to noise, obstacles, weather conditions which cause shadowing, the multi-path effect, and loss of signal. In this project, the main objective is to develop a localization system consisting of emitting and receptor modules which allow the improvement of the process and diminishing of energy consumption to optimize position estimation in indoors and outdoors environments in different scenarios. To accomplish the design and implementation of this system, certain specifications were followed from the science and design methodology, which starts with smart sensor nodes which modulate and optimize localization methods for the positioning of a mini drone, which has as its main characteristic the autonomous navigation through a marked route. Multiple evaluations were performed of the UAV (Unmanned Aerial Vehicles), in two different environments, each one with different dimensions, in which the angle where is best signal is found is obtained and, with that, the precision error. Then, each one of these data is interpreted, determining that the proposed localization system tends to improve the estimation of the localization and gives the option to model an object or a 3D environment using photos.

Key-Words:

Indoor and Outdoor Environment, positioning, Radio Frequency, Wi-Fi, Smart Antennae, Received Signal Strength, Yagi antenna, AoA, Euclidean distance, photogrammetry, angle, mini drone, UAV, autonomous, ESP8266-XX, Design Science.

Índice de Figuras

Figura 2.1. Sistema de Localización Pozyx.....	18
Figura 2.2. Aplicación IndoorAtlas	19
Figura 2.3. Tecnología Nextome	20
Figura 2.4. Sistema Comercial Wifarer	20
Figura 2.5. YooBee Smartphones con Android o iOS	21
Figura 2.6. YooBee-Hardware.....	22
Figura 3.1. Estratos para la Ingeniería de Software.....	24
Figura 3.2. DS: Interacción Artefacto-Entorno	25
Figura 3.3. Framework-Investigación Ciencia del Diseño	27
Figura 3.4. Ondas Electromagnéticas	28
Figura 3.5. Características-Sensores Inalámbricos.....	30
Figura 3.6. Topologías de red.....	32
Figura 3.7. Elementos de un WSN	33
Figura 3.8. Elementos de un Nodo Inalámbrico	34
Figura 3.9. Localización: Superficie de la Tierra	36
Figura 3.10. Dead Reckoning 2-D.....	38
Figura 3.11. Trilateración 2D	39
Figura 3.12. Medida TDoA: Hipérbola	40
Figura 3.13. Posicionamiento-base AoA en un entorno	41
Figura 3.14. Posicionamiento RSS-AoA.....	42
Figura 3.15. Arquitectura Wi-Fi	45
Figura 3.16. Módulo ESP8266-12E	47
Figura 3.17. Módulo ESP8266-01	47
Figura 3.18. Antena Yagi	48
Figura 3.19. Micro Servo SG90	49
Figura 3.20. Drone CX-10W	50
Figura 3.21. Modelo 3D-AutoDESK Remake	52

Figura 4.1. Arquitectura general del Sistema de Localización.....	61
Figura 4.2. Arquitectura específica del sistema de localización.....	62
Figura 4.3. Arquitectura específica del sistema UAV	62
Figura 4.4. Paquetes TCP y UDP- Packet Capture.....	65
Figura 4.5. Captura de paquetes UDP	66
Figura 4.6. Aplicación del control del drone	67
Figura 4.7. Funcionalidad de módulo Transmisor.....	70
Figura 4.8. Funcionalidad del módulo Receptor	72
Figura 4.9. Prototipo del Módulo de Localización Wi-Fi	73
Figura 4.10. Diagrama electrónico del nodo sensor	73
Figura 4.11. Funcionalidad del módulo de posicionamiento.....	75
Figura 4.12. Técnica AoA – 3 nodos.....	76
Figura 4.13. Área de Incertidumbre-AoA	77
Figura 4.14. Estimación-peso a los nodos	78
Figura 4.15. Interfaz gráfica de localización	81
Figura 4.16. Interfaz gráfica-Presentación de resultados de forma gráfica y teórica .	82
Figura 4.17. Funcionalidad Aplicación de Control	84
Figura 5.1. Proceso de adquisición del ángulo de punta	89
Figura 5.2. Escenario Ambiente Interno 5x5m	90
Figura 5.3. Escenario Ambiente Interno 10x10m	91
Figura 5.4. Escenario Ambiente Externo 5x5m	92
Figura 5.5. Escenario Ambiente Externo 10x10m	93
Figura 5.6. Latitud Longitud Coordenadas- Aplicación de localización inmediata...	94
Figura 5.7. Wifi Analyzer -programa que detecta la fuerza de señal	101
Figura 5.8. (a) Ambiente Interno y Externo 5x5m. (b) Ambiente Interno y Externo 10x10m	102
Figura 5.9. (a) Imagen del drone autónoma. (b) Modelo 3D del objeto presente en la imagen.	104
Figura A.1.1. Interfaz gráfica en Ambiente Interno- Escenario 5x5m en estado estático	119

Figura A.1.2. Interfaz gráfica en Ambiente Interno-Escenario 5x5m en estado dinámico lineal	120
Figura A.1.3. Interfaz gráfica en Ambiente Interno-Escenario 5x5m en estado dinámico multilineal	120
Figura A.1.4. Interfaz gráfica en Ambiente Interno- Escenario 10x10m en estado estático.....	121
Figura A.1.5. Interfaz gráfica en Ambiente Interno- Escenario 10x10m en estado dinámico lineal	121
Figura A.1.6. Interfaz gráfica en Ambiente Interno- Escenario 10x10m en estado dinámico multilineal	122
 Figura A.2.1. Interfaz gráfica en Ambiente Externo- Escenario 5x5m en estado estático	123
Figura A.2.2. Interfaz gráfica en Ambiente Externo-Escenario 5x5m en estado dinámico lineal	123
Figura A.2.3. Interfaz gráfica en Ambiente Externo-Escenario 5x5m en estado dinámico multilineal	124
Figura A.2.4. Interfaz gráfica en Ambiente Externo- Escenario 10x10m en estado estático.....	124
Figura A.2.5. Interfaz gráfica en Ambiente Externo- Escenario 10x10m en estado dinámico lineal	125
Figura A.2.6. Interfaz gráfica en Ambiente Externo- Escenario 10x10m en estado dinámico multilineal	125
 Figura A.3.1. (a)Ambiente Interno - (b)Ambiente Externo - Escenario 5x5m en estado estático - Intensidad de señal	126
Figura A.3.2. (a)Ambiente Interno - (b)Ambiente Externo - Escenario 5x5m en estado dinámico lineal - Intensidad de señal (Punto Inicial)	127
Figura A.3.3. (a)Ambiente Interno - (b)Ambiente Externo - Escenario 5x5m en estado dinámico lineal - Intensidad de señal (Punto Final)	128
Figura A.3.4. (a)Ambiente Interno - (b)Ambiente Externo - Escenario 5x5m en estado dinámico multilineal - Intensidad de señal (Punto Inicial).....	129

Figura A.3.5. (a)Ambiente Interno - (b)Ambiente Externo - Escenario 5x5m en estado dinámico multilineal - Intensidad de señal (Punto Final).....	129
Figura A.3.6. (a)Ambiente Interno - (b)Ambiente Externo - Escenario 10x10m en estado estático - Intensidad de señal.....	130
Figura A.3.7. (a)Ambiente Interno - (b)Ambiente Externo - Escenario 10x10m en estado dinámico lineal - Intensidad de señal (Punto Inicial).....	131
Figura A.3.8. (a)Ambiente Interno - (b)Ambiente Externo - Escenario 10x10m en estado dinámico lineal - Intensidad de señal (Punto Final)	131
Figura A.3.9. (a)Ambiente Interno - (b)Ambiente Externo - Escenario 10x10m en estado dinámico multilineal - Intensidad de señal (Punto Inicial).....	132
Figura A.3.10. (a)Ambiente Interno - (b)Ambiente Externo - Escenario 10x10m en estado dinámico multilineal - Intensidad de señal (Punto Final).....	133

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Fases del Proceso DS.....	7
Tabla 3.1. Directrices de la Investigación de Ciencia del Diseño	26
Tabla 3.2. Topologías para un WSN	31
Tabla 3.3. Características-Estándar IEEE 802.11.....	45
Tabla 3.4. Especificaciones SG90 Servo Motor.....	49
Tabla 3.5. Especificaciones del Drone CX-10W.....	50
Tabla 4.1. Requisitos funcionales del Sistema UAV.....	57
Tabla 4.2. Requisitos funcionales del Sistema de Localización.....	57
Tabla 4.3. Requisitos No Funcionales del Sistema UAV.....	58
Tabla 4.4. Requisitos No Funcionales del Sistema de Localización	58
Tabla 4.5. Requisitos de Rendimiento del Sistema UAV.....	59
Tabla 4.6. Requisitos de Rendimiento del Sistema de Localización.....	59
Tabla 5.1. Definición conceptual de las variables evaluadas	87
Tabla 5.2. Definición operacional de las variables evaluadas	88
Tabla 5.3. Resultados Ambiente Interno-Escenario 5x5m.....	91
Tabla 5.4. Resultados Ambiente Interno-Escenario 10x10m.....	92
Tabla 5.5. Resultados Ambiente Externo-Escenario 5x5m.....	93
Tabla 5.6. Resultados Ambiente Externo-Escenario 10x10m.....	94
Tabla 5.7. Error Ambiente Interno-Escenario 5x5m	95
Tabla 5.8. Error Ambiente Interno-Escenario 10x10m	95
Tabla 5.9. Error Ambiente Externo-Escenario 5x5m	96
Tabla 5.10. Error Ambiente Externo-Escenario 10x10m	96
Tabla A.1.1. Posiciones en Ambiente Interno -Escenario 5x5m en estado estático.	119
Tabla A.1.2. Posiciones en Ambiente Interno- Escenario 5x5m en estado dinámico lineal	120

Tabla A.1.3 Posiciones en Ambiente Interno-Escenario 5x5m en estado dinámico multilineal	120
Tabla A.1.4. Posiciones en Ambiente Interno-Escenario 10x10m en estado estático	121
Tabla A.1.5. Posiciones en Ambiente Interno-Escenario 10x10m en estado dinámico lineal	121
Tabla A.1.6. Posiciones en Ambiente Interno-Escenario 10x10m en estado dinámico multilineal	122
 Tabla A.2.1. Posiciones en Ambiente Externo -Escenario 5x5m en estado estático	123
Tabla A.2.2. Posiciones en Ambiente Externo- Escenario 5x5m en estado dinámico lineal	123
Tabla A.2.3. Posiciones en Ambiente Externo-Escenario 5x5m en estado dinámico multilineal	124
Tabla A.2.4. Posiciones en Ambiente Externo-Escenario 10x10m en estado estático	124
Tabla A.2.5. Posiciones en Ambiente Externo-Escenario 10x10m en estado dinámico lineal	125
Tabla A.2.6. Posiciones en Ambiente Externo-Escenario 10x10m en estado dinámico multilineal	125
 Tabla A.3.1. Ambiente Interno y Externo-Escenario 5x5m en estado estático-Intensidad de Señal	126
Tabla A.3.2. Ambiente Interno y Externo-Escenario 5x5m en estado dinámico lineal-Intensidad de Señal	127
Tabla A.3.3. Ambiente Interno y Externo-Escenario 5x5m en estado dinámico multilineal-Intensidad de Señal	128
Tabla A.3.4. Ambiente Interno y Externo-Escenario 10x10m en estado estático-Intensidad de Señal	130
Tabla A.3.5. Ambiente Interno y Externo-Escenario 10x10m en estado dinámico lineal-Intensidad de Señal	130
Tabla A.3.6. Ambiente Interno y Externo-Escenario 10x10m en estado dinámico multilineal-Intensidad de Señal	132

Lista de Ecuaciones

Ecuación 3.1. Ecuaciones de Maxwell	29
Ecuación 3.2. Ecuación de la recta AM'	42
Ecuación 3.3. Ecuación de la recta BM'	43
Ecuación 3.4. Coordenadas Punto de Intersección-AoA.....	44
Ecuación 3.5. Distancia Euclidiana	63
Ecuación 4.1. Máximo número de intersecciones	75
Ecuación 4.2. Área de un polígono convexo	77
Ecuación 4.3. Coordenada X-Centroide del polígono convexo	78
Ecuación 4.4. Coordenada Y- Centroide del polígono convexo	78
Ecuación 4.5. Coordenada X-Punto Estimado Final	79
Ecuación 4.6. Coordenada Y-Punto Estimado Final	79

Lista de Siglas

APs	Access Points
AC	Alternate Current
ADB	Android Debug Bridge
AoA	Angle of Arrival
API	Application Programming Interface
2D	Bidimensional
BLE	Bluetooth Low Energy
dBm	Decibel-milliwatts
DS	Design Science
DSR	Design Science Research
DSRM	Design Science Research Methodology
DC	Direct Current
DoA	Direction of Arrival
FM	Frequency Modulation
GPIO	General Purpose Input/ Output
GPS	Global Positioning System
IS	Information Systems
IDE	Integrated Drive Electronics
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
JVM	Java Virtual Machine
LED	Light-Emitting diode
LOS	Line-of-Sight
LBS	Location Based Services
MP	Mega Pixels
MCU	Microcontroller unit
NLOS	Non-Line-of-Sight
OPDG	Orthogonal Perfect DFT Golay

RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency Identification
RSS	Received Signal Strength
RSSI	Received Signal Strength Indication
RPV	Remotely Piloted Vehicle
RTToF	Round-Trip Time of Flight
SSID	Service Set Identifier
SDK	Software Development Kit
TDM-CDMA	Time Division Multiplexing-Code Division Multiple Access
ToA	Time of Arrival
ToF	Time of Flight
TCP	Transmission Control Protocol
3D	Three-dimensional
Ubicomp	Ubiquitous Computing
UWB	Ultra-Wideband
USB	Universal Serial Bus
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
UDP	User Datagram Protocol
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WS	Wireless Sensor
WSNs	Wireless Sensor Networks

Índice

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	III
NOTA PREVIA	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XV
LISTA DE ECUACIONES	XVII
LISTA DE SIGLAS	XIX
ÍNDICE.....	XXI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Definición del problema	3
1.2. Hipótesis	4
1.3. Justificación e Importancia	4
1.4. Alcance	5
1.5. Objetivos	6
1.5.1. General.....	6
1.5.2. Específicos.....	7
1.6. Metodología	7
1.7. Esquema (Estructura del documento)	9
2. REVISIÓN ESTADO DEL ARTE	11
2.1. Sistema de Localización	11
2.1.1. Wi-Fi.....	13
2.1.2. Identificación de Radio Frecuencia (RFID)	14
2.1.3. Bluetooth	15
2.1.4. FM	16
2.1.5. Híbrido.....	16
2.2. Vehículo Aéreo no Tripulado	16
2.3. Sistemas de Posicionamiento – UAV	17

2.4.	Aplicaciones Comerciales.....	18
2.4.1.	Pozyx	18
2.4.2.	IndoorAtlas	19
2.4.3.	Nextome	19
2.4.4.	Wifarer.....	20
2.4.5.	YooBee	21
2.5.	Síntesis	22
3.	TERMINOLOGÍA Y CONCEPTOS	23
3.1.	Ingeniería de Software	23
3.2.	Metodología DS	24
3.2.1.	Definición	24
3.2.2.	Principios	25
3.2.3.	Framework y Ciclos DSR.....	26
3.2.4.	Metodología DS en el desarrollo de este trabajo	27
3.3.	Ondas Electromagnéticas.....	27
3.3.1.	Ecuaciones de Maxwell	28
3.3.2.	Sensores Inalámbricos	29
3.4.	Redes de Sensores Inalámbricos.....	30
3.4.1.	Características en Redes de Sensores Inalámbricos	31
3.4.2.	Arquitectura de un WSN	33
3.5.	Localización	35
3.5.1.	Localización: representación	36
3.5.2.	Técnicas y Algoritmos de Localización	37
3.5.3.	Sistemas de Localización.....	44
3.6.	Sistema de Localización Interno y Externo	46
3.6.1.	Módulos ESP-8266.....	46
3.6.2.	Antena Yagi	48
3.6.3.	Micro Servo SG90	48
3.7.	Movilidad del UAV	49
3.7.1.	Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV).....	50
3.7.2.	Drone Cheerson CX-10W	50
3.8.	Sistema de Fotogrametría	51
3.8.1.	Fotogrametría	51

3.8.2. AutoDESK Remake.....	52
3.9. Síntesis	52
4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	55
4.1. Diseño	55
4.1.1. Especificación del Alcance y Análisis de Requisitos	56
4.2. Diseño Conceptual	59
4.2.1. Arquitectura del Sistema	59
4.3. Implementación del Sistema	63
4.3.1. Sistema UAV-Módulo de vuelo	64
4.3.2. Sistema de Localización	68
4.4. Análisis de Solución	84
4.5. Síntesis	85
5. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS	87
5.1. Metodología de Evaluación	87
5.2. Evaluación del Sistema de Localización y UAV	89
5.2.1. Prueba en Ambiente Interno	90
5.2.2. Prueba en Ambiente Externo	92
5.2.3. Criterios de Evaluación - Precisión	94
5.2.4. Análisis Ambiente Interno y Externo	98
5.3. Evaluación de la Señal Medida.....	100
5.3.1. Prueba en Ambiente Interno y Externo	101
5.4. Evaluación del Sistema de Fotogrametría	103
5.5. Síntesis	104
6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	107
6.1. Conclusiones	107
6.2. Trabajo Futuro	108
BIBLIOGRAFÍA	109
ANEXOS	119
ANEXO A – ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS	119
A.1. Pruebas en Ambiente Interno.....	119
A.1.1. Escenario 5x5m	119
A.1.2. Escenario 10x10m	121
A.2. Pruebas en Ambiente Externo.....	122

A.2.1.	Escenario 5x5m	123
A.2.2.	Escenario 10x10m	124
A.3.	Pruebas de la Intensidad de la Señal Recibida.....	126
A.3.1.	Pruebas en Ambiente Interno y Externo.....	126
ANEXO B – PAPER CIENTÍFICO		135
ANEXO C – PAPER CIENTÍFICO		143

1. Introducción

El mundo está evolucionado constantemente uno de los fines del hombre es el de ir construyendo dispositivos inteligentes, que sustituyan el trabajo físico e intelectual. Estas condiciones son parte fundamental en la reproducción de inteligencia humana, que mediante máquinas interactúan con el medio, logran satisfacer las diferentes necesidades y así brindar una mejor calidad de vida.

A través de los años, la tecnología ha exigido diversos cambios, lo que ha provocado el desarrollo de los objetos inteligentes (Smart Objects), y con ello el Internet de las cosas (Internet of Things, IoT). Esto se remonta a la visión de Mark Weiser dentro de la computación ubicua (Ubiquitous Computing, ubicomp) en 1991, término dado a la tercera era de la informática moderna, donde simboliza que las personas serán rodeadas de ordenadores e interactuar de una manera transparente, invisible y no obstructiva (Abowd & Mynatt, 2000) (Turró, 2005); generando un mundo donde cada persona posee y utilice infinidad de ordenadores.

Años atrás Weiser, visualizó la proliferación de dispositivos a gran escala. Desde finales de los 90s el objetivo ha sido la interconexión de objetos que forme un entorno inteligente, esto ha inspirado la exploración de técnicas para la reutilización espacial del espectro radioeléctrico (Krumm, 2016). Hoy en día esa visión es un hecho, a la cual se le suma el continuo desarrollo de nuevas aplicaciones y redes, que son aprovechados tanto por los dispositivos como la infraestructura. Tales redes son de corto alcance, un ejemplo de ello son las redes de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Networks, WSNs), Bluetooth, identificación por radiofrecuencia (Radio Frequency Identification, RFID), y ZigBee (Bello & Zeadally, 2016). Todo ello ha permitido que ubicomp se desarrolle en un entorno informático completamente nuevo, donde se incorporó diferentes dispositivos tales como sensores, controladores, seguimiento de ubicación, cámaras, entre otros, estos brindan diferente información relevante al espacio en el que se encuentra el usuario.

Las diferentes tecnologías de localización que forman parte de ubicomp, han sido estudio de la última década, cuentan con una combinación de métodos y técnicas que tienen la capacidad de determinar la ubicación del usuario, del mismo dispositivo u objeto (Krumm, 2016). Sin embargo, estas forman una dependencia a los WSNs, que son dispositivos esparcidos en diferentes áreas, que permiten medir condiciones locales o remotas (e. g., temperatura, presión, sonido, movimiento, velocidad, luminosidad, etc.) (Mokbel, Chow, & Aref, 2016) (Bensky, 2016).

Estas condiciones han desarrollado una mayor demanda en la entrega de información, que en este caso es el conocimiento de la ubicación geográfica, generadas por diferentes alertas que son indispensables para los servicios basados en localización (Location Based Services, LBS) (Ahson & Ilyas, 2010). A estos sistemas se ha integrado la navegación por satélite, denominado como el sistema de posicionamiento global (Global Positioning System, GPS), completamente basado en satélites que proporciona sus funcionalidades tanto en ambientes interiores como exteriores (Dubey, 2014), tanto para el uso mercantil, civil y militar.

Una alternativa a este sistema es la tecnología IEEE 802.11, usada en comunicaciones sin hilos (Garg & Jhamb, 2013), que permite desarrollar un sistema inalámbrico en LBS. Este optimiza la asignación de recursos y mejora la contribución en redes inalámbricas, mediante la estimación de localización de un objeto, que es posible determinar a través de 5 factores: (i) Sistema de referencia espacial, (ii) métodos de medición que permiten el uso de diferentes parámetros, (iii) espacio, (iv) método de posicionamiento, y (v) protocolos que mejoran el proceso de localización (Axel, 2005).

Mediante estos factores es posible obtener información como: (i) ángulos, (ii) velocidad, (iii) tiempo de propagación, (iv) distancia, (v) indicador de fuerza de señal recibida (Received Signal Strength Indication, RSSI), entre otros; donde un objeto con respecto a uno o varios puntos, da un resultado con coordenadas conocidas y otras fuera del alcance de estudio (Axel, 2005).

Hoy en día estos sistemas de localización son aplicados para la ubicación de todo tipo de objeto, donde el incremento del alcance de señal y la supresión de interferencias de la misma permiten que sean usados, para dispositivos inteligentes, como son los vehículos aéreos no tripulados (UAV), llamados casualmente “drone”. Los avances en la tecnología electrónica y sensorial han permitido que los UAVs estén equipados con diferentes tecnologías como cámaras, sensores o módulos de comunicación.

Por tanto, un drone es considerado una construcción inteligente, que es respuesta a la mayoría de necesidades en el sector militar, comercial y civil (Tretyakov & Surmann, 2008) (Valavanis, 2008). Estos dispositivos se caracterizan por la capacidad de ser aplicado en áreas tales como vigilancia, logística, misiones de búsqueda y rescate manejados en zonas de peligro e infraestructuras críticas; donde los desafíos aéreos son los obstáculos, conexión, distancias e inconvenientes físicos de los UAVs (Khosiawan & Nielsen, 2016). Consecuentemente, la ruta sobrevolada por el drone puede enviar diferente información que permite calcular la localización del dispositivo en tercera dimensión, a través de un sistema de posicionamiento y ubicación inteligente por medio de dispositivos interconectados, mediante técnicas y aplicaciones optimizadas. De hecho, se estima que en el 2025 los dispositivos crezcan más allá de miles de millones de objetos, a esto se le atribuye aproximadamente 1000 dispositivos por persona en el mundo (Ota, 2016).

1.1. Definición del problema

Actualmente el mundo de la informática ha buscado optimizar y desarrollar diferentes tecnologías que permitan la localización de objetos tanto en movimiento como estáticos. Los sistemas de localización permiten como su nombre lo dicen localizar un objeto o individuo, por medio de diferentes técnicas y métodos complejos de posicionamiento. No obstante, en la actualidad estos sistemas se encuentran interconectados a objetos inteligentes, que brindan información esencial para el cálculo de su ruta.

Sin embargo, la limitación con la que cuenta es debido a la tecnología usada en ambientes poco comunes: espacios cerrados, naturaleza, construcciones críticas, e incluso desastres naturales, como también los provocados por el hombre. Las distintas investigaciones realizadas a los sistemas de posicionamiento demostraron que: (i) La localización de dispositivos omnipresentes en espacios internos, hace que tengan una menor precisión debido a la influencia de múltiples trayectorias y radio disturbios (Yang, Kim, Son, & Han, 2014). (ii) Interferencia de señal en espacios cerrados, bosques densos, montañas y diferentes obstáculos que no permiten determinar la precisión, que genera un error de posicionamiento de alrededor de 10 metros (Kuo, Chen, Jen, & Lu, 2010). (iii) El uso de numerosos enfoques de posicionamiento hace que varíe en los diferentes términos de precisión, costo, tecnología, escalabilidad, robustez y seguridad (Alarifi, y otros, 2016). (iv) Por otro lado, la existencia de varios objetos hace que las señales no viajen directamente en trayectoria recta desde un emisor a un receptor, esto provoca retardos de tiempo inconsistentes en el receptor (Alarifi, y otros, 2016).

Además de las diferentes dificultades anteriormente planteadas, se tiene otro tipo de limitación, que en este caso son los diferentes dispositivos inteligentes como son los UAVS, estos han recibido un creciente interés donde se define que: (i) La pérdida de la conexión es debido a la distancia máxima que puede sobrevolar el vehículo (Rahman, 2014). (ii) La carga útil y limitaciones de potencia que restringen su vuelo a un tiempo de máximo 15 minutos (Gu, Zhou, Fu, & Wan, 2015). (iii) El enlace entre el hardware de comunicación y el UAV son constantes debido a los movimientos en curso causados por el aire causan cambios drásticos en la propagación de la señal (Asadpour, y otros, 2014).

Estos impedimentos han dado lugar a diferentes conocimientos que permitan diseñar e implementar tecnologías y métodos de manera optimizada, para mantener constante el enlace entre hardware de comunicación-drone, retardos de tiempo y sobre todo la precisión del UAV.

1.2. Hipótesis

El sistema de posicionamiento 2D basado en antenas inteligentes que implementan técnicas de localización y métodos de estimación de ubicación permite ubicar un UAV en forma autónoma en espacios internos y externos.

1.3. Justificación e Importancia

Los desastres naturales (terremotos, inundaciones, tsunamis, deslizamientos de tierra, avalanchas, etc.) y aquellas catástrofes provocadas por el hombre (petróleo y derrames químicos, explosiones, descarrilamientos de vehículos, etc.), han producido pérdidas humanas y materiales que son medidas en miles de billones de dólares (Pavkovic, Berbakov, Vrane, & Milenkovic, 2014). Estas calamidades han mostrado que América Latina padezca con frecuencia cambios climáticos, que generan una variedad de fenómenos ambientales que ha provocado la muerte de millones de vidas (Comercio, 2016).

Ecuador ha sido denominado un país “*multiamenazas*”, debido a los frecuentes desastres naturales provocados en los últimos años, un ejemplo de ello fue en abril del 2016 donde el terremoto ocurrido en las provincias costeras de Manabí y Esmeraldas, dejó más de 600 muertos, 12 personas desaparecidas y 80.000 damnificados, este panorama poco alentador fue debido a la destrucción de vías e infraestructuras que obstruían gran cantidad de caminos terrestres, al igual que el ingreso aéreo (República, 2016). Esto ha permitido que el personal

tanto militar como civil usen tecnología adecuada y disponible a estos casos como los vehículos aéreos no tripulados.

Sin embargo, estos vehículos al ser enviados a lugares críticos y de poco acceso, cuentan con el peligro de extraviarse o perder su curso, provocando que el usuario desconozca su localización. Esto justifica el desarrollo actual del proyecto, en particular su línea de vista e incluso múltiples potencias pueden interponerse en la localización geoespacial. Además de técnicas y métodos de posicionamiento que tienden a generar cierto nivel de error en cuanto a la ubicación del objeto o persona, esta problemática puede ser solucionada con un arreglo de antenas sensibles a las ondas electromagnéticas, que son capaces de recibir y emitir datos de un dispositivo específico a otro.

De acuerdo con estas y a las consideraciones antes presentadas es necesario que se desarrolle un sistema de localización bidimensional (2D), con la ayuda de tecnología y dispositivos que permitan optimizar el envío y recepción de datos, incluso tener una mejor percepción de la señal que logra la precisión del sistema con valor casi nulo de error. Esto proporciona un enfoque distinto para el uso y evaluación de dichos sistemas, con el objetivo de disminuir el error de ubicación de aquellos dispositivos que se encuentre tanto estáticos como dinámicos y emitan un cierto rango de potencia.

1.4. Alcance

El sistema por desarrollar utiliza diferentes tecnologías, plataformas y lenguajes de comunicación, que, sumado con el modelo matemático, permiten que el cálculo de posicionamiento tenga una mayor precisión y un menor error de distancia, con aquellos dispositivos móviles autónomos.

A partir de una búsqueda intensa de diferentes trabajos educativos y comerciales relacionados al tema, se describe cada uno de ellos con sus características y limitaciones. Dichos estudios dan lugar al diseño e implementación de un sistema de localización 2D, para mini vehículos autónomos que contempla lo siguiente:

Interfaz gráfica desarrollada en lenguaje Java, que puede ser ejecutado en todo sistema operativo que lo soporte, este hace uso de una librería denominada JxBrowser¹.

¹ JxBrowser. Librería usada para mostrar páginas web, además de un contenido HTML + CSS + JavaScript en aplicaciones Java (TeamDev, 2016).

Posteriormente presenta un mapa a través de la aplicación Google Maps, la cual permite que el usuario coloque las antenas con características específicas como: latitud, longitud, ángulo y dirección IP (Internet Protocol). Además, de ello la ubicación de *waypoints* que muestran la ruta que el UAV debe recorrer. Finalmente se despliega las redes que el ordenador logra captar, con la opción de escoger la señal del dispositivo a localizar.

En la pestaña continua de la misma interfaz presenta cuatro tipos de gráficos, tres de ellos muestran la potencia de cada señal detectada por cada módulo y el restante la ruta seguida por el drone. Además, indica al usuario las coordenadas calculadas que simulan el lugar estimado del drone.

La movilidad del drone cuenta con dos tipos de protocolos, el primero obtiene visualización del espacio por medio del video y el segundo el control del UAV a través de comandos que permitan el manejo en espacio 2D. A esto se le suma la forma automática de tomar fotos con la ayuda de la cámara con la que cuenta el drone, estas imágenes son mostradas al usuario con la opción de generar un modelo tridimensional (3D).

El prototipo de posicionamiento cuenta con dispositivos inteligentes que trabajan como emisor y receptor de la señal, por medio de la tecnología Wi-Fi, que evita que cada modelo se encuentre conectado al ordenado, esto permite que su carga y envío de datos no dependa de un cable de red.

Finalmente, las pruebas a realizar serán con la ayuda de un arreglo de prototipos de posicionamiento ubicados en diferentes puntos, el espacio de prueba simula un plano coordinado de dos dimensiones que están asociados a un valor.

1.5. Objetivos

1.5.1. General

Diseñar e implementar un sistema de posicionamiento 2D mediante la utilización de antenas inteligentes que implementan técnicas de localización y métodos de estimación de ubicación, para ubicar un mini vehículo no tripulado en forma autónoma en espacios externos e internos.

1.5.2. Específicos

- Analizar los diferentes sistemas y tecnologías de localización y métodos de estimación de ubicación mediante la investigación de estudios y trabajos realizados en los últimos años en el medio académico y comercial.
- Diseñar un sistema de posicionamiento 2D mediante la utilización de antenas inteligentes que implementan técnicas de localización y métodos de estimación de ubicación.
- Desarrollar una interfaz gráfica que permita visualizar la ruta de navegación y los indicadores de potencia entregados por cada una de las antenas inteligentes.
- Realizar pruebas de posicionamiento autónomo de un mini vehículo no tripulado en estado estático y dinámico del drone.

1.6. Metodología

En el desarrollo de este sistema, se optó la metodología Ciencia del Diseño (Design Science, DS) en la investigación en sistemas de información (Information Systems, IS), sugerida por Hevner et al. Esta metodología se orienta en la creación de artefactos óptimos que cumple con tres objetivos: (i) ser consistente en estado del arte, (ii) definir un modelo de proceso nominal y (iii) mostrar un modelo mental que presenta y evalúa la investigación DS. En la Tabla 1.1 se observa las fases del proceso DS (Peffers, Tuunanen, Rothenberger, & Chatterjee, 2007).

Tabla 1.1. Fases del Proceso DS

Fases del Proceso DS	
1. Identificación del Problema	5. Desarrollo
2. Motivación del Problema	6. Demostración
3. Definición de Objetivos	7. Evaluación
4. Diseño	8. Comunicación

A continuación, se describe cada una de las fases:

- **Identificación del Problema:** Búsqueda de los diferentes sistemas de posicionamiento, que permitió analizar la precisión de las diferentes aplicaciones tanto en ambientes internos como externos, a través de un estudio metódico de las técnicas y dispositivos a localizar, lo que da origen a la identificación del problema;

- **Motivación del Problema:** La localización de ciertos vehículos en lugares críticos que cuentan con un acceso restringido de la señal GPS, lo que provoca el incremento de error de posicionamiento e incluso la pérdida absoluta de información;
- **Definición de Objetivos:** De acuerdo con la definición de problemas se logró establecer que directrices se tomó en cuenta, para el desarrollo e investigación del artefacto que logró posicionar con un error mínimo de localización en ambientes internos como externos, para vehículos que tienen movilidad autónoma;
- **Diseño:** Está definida por el alcance y requisitos funcionales y no funcionales, que permitió establecer un diseño óptimo que cumple las necesidades de usuario, para el sistema de localización mediante antenas inteligentes y la optimización de una técnica de localización, que logran posicionar un mini vehículo autónomo en movimiento. Esto da lugar a la arquitectura que define las acciones del sistema, que facilitó la elaboración de diagramas de caso de uso que logró especificar las diferentes operaciones que el sistema realizaría;
- **Desarrollo:** La implementación del sistema se dividió en tres partes: (i) sistema de localización, (ii) sistema UAV, (iii) e interfaz de usuario. Cada una de ellas cuenta con operaciones específicas que logró optimizar la aplicación total;
- **Demostración:** La ruta que el UAV logra realizar, es detectada por las antenas inteligentes y presentada en la interfaz gráfica, comparado con la trayectoria original impuesta por el usuario muestra el error de posicionamiento;
- **Evaluación:** Para probar la calidad del software se utilizan tres nodos de detección en diferente posición. Posteriormente se realizaron tres tipos de evaluaciones, uno estático y otros dos dinámicos en escenario lineal y bidimensional, cada una cuenta con dos tipos de pruebas de 5x5 metros y 10x10 metros definido en un plano cartesiano, tanto en ambiente interno como externo. Con los datos recolectados se ejecutó el análisis de ellos, a través de una comparación entre los datos del ambiente interno y externo, y observar cuál de ellos presenta una mejor precisión;
- **Comunicación:** Está dirigido a dos tipos de poblaciones en: (i) alto riesgo de destrucción y, (ii) comunidad científica. Esta última tiene la capacidad de optimizar y dirigir esta implementación a otro nivel, es decir implementar diferente tipo de tecnología y obtener otro tipo de resultados con menos error de precisión al ya obtenido con este proyecto.

1.7. Esquema (Estructura del documento)

Este proyecto está documentado de acuerdo con los objetivos, alcance y justificación definida en secciones anteriores. A continuación, se detalla de la siguiente manera la estructura del documento.

Capítulo 2 En este capítulo, se realizó una revisión bibliográfica de estudios previos, tanto académicos y como comerciales, sobre tres diferentes temas, como son: (i) sistema de localización, (ii) UAVs, y (iii) sistema de localización en diferentes ambientes.

Capítulo 3 Este capítulo presenta una breve descripción de varios conceptos y términos fundamentales desde sistemas de localización, dispositivo UAV, técnicas y métodos hasta procesamiento de imágenes. El estudio de parámetros que permiten la solución a la problemática, mediante análisis en dos dimensiones por medio de un dispositivo autónomo, para la estimación del error dimensional.

Capítulo 4 En este capítulo se detalla el diseño y desarrollo de la solución propuesta, donde se define requisitos funcionales y no funcionales, para llegar a cumplir la final del proyecto. Después se presentó la arquitectura general y específica, donde se detalló los diferentes módulos receptores y emisores, al igual que el software desarrollado.

Capítulo 5 Este capítulo muestra las diferentes pruebas realizadas al sistema de localización, tanto en espacios internos, como externos y con diferentes dimensiones e implementaciones específicas. En este capítulo se presenta los diferentes resultados con su correspondiente análisis por medio de la comparación de escenarios, así se demostró que las hipótesis anteriormente planteadas fueron validadas.

Capítulo 6 Finalmente, este capítulo muestra las principales conclusiones de este proyecto. Además de sugerencias para respectivos cambios y mejoras que pueden ser incluidos a futuro en el sistema de localización, por medio de la optimización y control del movimiento de los diferentes dispositivos inteligentes.

2. Revisión Estado del Arte

Esta sección forma parte de la fase Ambiente perteneciente a la metodología DS, que es una descripción breve de los diferentes estudios realizados en los últimos años tanto académicos como comerciales, que cubren las diferentes áreas a tratar en el presente proyecto como son sistemas de posicionamiento, drones y ambos temas en conjunto.

2.1. Sistema de Localización

Con el creciente número de usuarios y el continuo desarrollo tecnológico, se ha hecho más sensible a ciertos cambios donde todo es interconectado por medio de la red, a esto se le suma la necesidad de conocer el posicionamiento mediante un sistema de localización, que hace que el dispositivo esté disponible para diferentes servicios como vigilancia, monitoreo y rastreo. Aquellas aplicaciones son un complemento importante para las diferentes tecnologías inalámbricas omnipresentes, en algunos casos son pequeños sensores heterogéneos que proporcionan una posición precisa dentro de estructuras cerradas o sin límites de visión (Non-Line-of-Sight, NLOS), esta es una alternativa a los sistemas de posicionamiento global (Global Positioning System, GPS), que su señal en efecto no alcanza a ser receptado dentro de edificios. Existen diversas razones una de ellas es el efecto múltiple trayectoria, donde se mitiga la señal cuando se ve reflejada ante las paredes o diferentes obstáculos, e incluso interferencia de ruido, que logra el retraso y en ocasiones la perdida absoluta de esta.

En la siguiente información se define cuatro tipos de sistemas de localización inalámbrica con sus respectiva ventaja y desventaja que presenta ante el uso del usuario.

- **Sistema de Posicionamiento Global**, es una de las tecnologías con mayor popularidad en la actualidad, es la solución perfecta para localizar objetos en el ambiente externo, en entornos internos su función es diferente, debido a la interferencia de la línea de vista entre el satélite y el receptor, la señal en ocasiones atenúa tanto las estructuras u objetos en el aire abierto. La gran mayoría de personas usa este tipo de sistemas, GPS, por tanto

no cumple en su totalidad con la función de seguimiento, sobre todo en espacios internos (Garg & Jhamb, 2013).

- **Sistema basado en Radiación Infrarroja**, es una estructura simple, de bajo costo y de fácil movilidad, para la detección o el seguimiento de objetos o personas. Este sistema se encuentra presente en dispositivos inalámbricos y cableados, su principal característica es la comunicación de línea de visión (Line-of-Sight, LOS) entre el transmisor y receptor, sin ninguna interferencia de fuentes de luz fluorescente y luz solar (Casas, Cuartielles, Marco, Gracia, & Falco, 2007). Esta tecnología cuenta con varias desventajas un ejemplo de ello son las líneas de visión corta, distancia de transmisión y un elevado costo en mantenimiento del hardware (Xiao, Liu, Yang, Liu, & Han, 2011) (Gu, Lo, & Niemegeers, 2009).
- **Sistema basado en Radio Frecuencia (Radio Frequency, RF)**, es utilizado principalmente en sistemas de posicionamiento interno, donde las ondas electromagnéticas pueden viajar a través de las paredes, objetos y cuerpos humanos, debido al área de cobertura que este cubre y la frecuencia que ellos emiten (Vorst, y otros, 2008). Estos sistemas cuentan con una cantidad menor de hardware y con mayor capacidad de procesamiento de información, esto permite el uso de varias técnicas de triangulación y fingerprinting² (Gu, Lo, & Niemegeers, 2009). Las tecnologías basadas en RF se dividen en WLAN (Wireless Local Area Network), RFID, Bluetooth, ZigBee, UWB (Ultra-Wideband), FM (Frequency Modulation) e Híbrido.
- **Sistema basado en Ultrasonido**, es una tecnología que usa ondas ultrasónicas, que permite medir la distancia y estimar la posición entre la estación fija y el dispositivo móvil a localizar. Para la implementación de este sistema es necesario una cantidad elevada de receptores ultrasónicos, que alcanzan la señal instantáneamente. Posteriormente el receptor mide el tiempo entre la señal y la detección de las ondas, esto permite que cada módulo calcule la distancia entre el transmisor y el receptor (Mainetti, Patrono, & Sergi, 2014). Estas señales tienen la desventaja de no penetrar a través de las paredes, debido a la capacidad de reflejar la mayor cantidad de obstrucciones, esto provoca la recepción multirayectoria (multipath) que induce a una menor precisión en el cálculo de posicionamiento, además de impedir la implementación compleja a gran escala (Medina, Segura, & Holm, 2012).

² Fingerprinting: Método de estimación de posición eficaz basada en RSS, usada en el cálculo de ubicación tanto de un objeto, dispositivo o usuario (Lin & Lin, 2005) (Liu, Banerjee, & Liu, 2007).

El presente proyecto enfoca sus estudios al sistema de Radio Frecuencia, que tiene la oportunidad de trabajar con varias tecnologías. Un claro ejemplo de ello fue el proyecto pionero denominado RADAR (Bahl & Padmanabhan, 2000), que es un sistema basado en radiofrecuencia (RF), para la localización de los usuarios, mediante el uso de la intensidad de la señal recibida (Received Signal Strength, RSS) y fingerprinting, con un alcance de error media de 2.94m.

A través de los años las técnicas de localización han sido sinónimo de estudio y avance, debido al desarrollo de dispositivos actuales, que trabajan con tecnologías de acceso inalámbrico de última generación, que brindan cierta información como la estimación de posicionamiento. A continuación, se define varias tecnologías con su respectiva característica, ventajas, desventajas y aplicaciones.

2.1.1.Wi-Fi

Es una tecnología que ha impuesto una demanda de sistemas en el mercado, que son compatibles con la gran mayoría de dispositivos ubicuos y no tienen la necesidad de una mayor manipulación del hardware para dichos sistemas. Para el debido cálculo de la posición se mide la RSS, que es la intensidad de la señal disponible en las comunicaciones RF residentes en un nodo, utilizado para distinguir los dispositivos inalámbricos en la detección de su posicionamiento, que se encuentran disponibles en el rango de recepción, a través de los algoritmos de posición (Ash & Potter, 2004).

La ventaja de este sistema es la escalabilidad con la que cuenta en costos de hardware y la cantidad de dispositivos móviles que hacen uso de este servicio, además de contar con la capacidad de penetrar a través de las paredes donde no es factible el ingreso de la señal del GPS. Sin embargo, los problemas de este sistema son las posibles interferencias con otros dispositivos que cuentan con el mismo canal, e incluso la multirayectoria de la señal por presencia de varios obstáculos (Ismail, Fathi, Boud, Nurdiana, & Ibrahim, 2008). A continuación, se expone varias investigaciones que han utilizado la tecnología Wi-Fi en sistemas de posicionamiento en espacios internos y externos.

Así, por ejemplo, el trabajo propuesto por Zhong et. al. (2016), *WiFi Indoor Localization Base on K-Means*, que reduce la influencia de los factores ambientales, para mejorar la precisión de posicionamiento y así ampliar el área de ubicación, a través del método de posicionamiento inalámbrico basado en K-Means, que es el método de agrupación, que divide los datos al ser

procesados en un número de clases. El objetivo de esta agrupación es lograr la máxima distancia entre el agrupamiento y el agrupamiento para minimizar la distancia, utilizado para tener en cuenta el efecto de los valores obtenidos. Los resultados muestran que la precisión de probabilidad de posicionamiento de 3 metros es del más del 80% de exactitud.

La implementación de la técnica precisa de localización de banda estrecha utiliza señales Wi-Fi 802.11g en espacios internos (Loyez, Bocquet, Lethien, & Rolland, 2015), que propone un sistema estereoscópico a través de Access Points (APs) remotos y locales, que se enlaza a través de una Fibra Multimodo (Multimode Fiber). Esta es una solución que enlaza ópticamente cuatro APs, pero sin comunicación entre ellos, posteriormente recoge las señales desde un transmisor localizado en la parte entrante del área de localización. Sin embargo, la contribución de señal puede degradar la forma de la onda, sin afectar la precisión de la localización que llega a un valor inferior a 6.4cm.

Holografía de radiación Wi-Fi (Holl, 2017) propuesta por Philipp Holl, es un sistema que permite escanear un lugar mediante transmisión Wi-Fi, a través de dos antenas una fija y una móvil. Cada uno cumple diferente función, sin embargo, ambos registran el mismo espacio, tanto de fondo como desde diferentes puntos, que graban no solo la intensidad de la señal Wi-Fi, sino también la luz que proviene de una onda. Esto permite obtener diferentes imágenes bidimensionales, que al juntarlas se forma en un holograma 3D, que muestra así objetos de hasta 4 centímetros de tamaño.

2.1.2.Identificación de Radio Frecuencia (RFID)

Esta tecnología es prometedora en cuanto a los sistemas de posicionamiento de dispositivos ubicuos, objetos o personas. RFID permite una comunicación inalámbrica unidireccional, con tecnología de identificación automática avanzada y sin contacto entre emisor y receptor, que a través de señales de radio que emite una etiqueta o tag RFID, logra alcanzar la identificación automática, el seguimiento y administración de los objetos, además de recuperar y almacenar datos remotamente (Farid, Nordin, & Ismail, 2013).

Un trabajo de esta tecnología es el denominado “A Real-time RFID Localization Experiment Using Propagation Models” (Brchan, Zhao, Wu, Williams, & Pérez, 2012), que presenta un sistema de localización en tiempo real implementada a un sistema RFID activo, que utiliza diferentes técnicas para medir la fuerza de señal recibida y etiquetas de referencia para el rango. A esto se le suma el algoritmo que logra mejorar el rendimiento de este sistema, por medio de

múltiples modelos de propagación. Los resultados alcanzados muestran que a mayor uso de etiquetas mejora el sistema, y a su vez reduce las medidas incorrectas de la intensidad de señal recibida. Este proyecto propone una precisión de localización del 1 metro con más del 50% en los sistemas 2D.

Edwards et al. (2016), presenta una tecnología que permite establecer y localizar una comunicación vehicular, que logra generar un sistema de transporte inteligente. Este sistema cuenta con el uso de diversas tecnologías como es el GPS y de complemento el RFID. Sin embargo, al integrar el RFID se tiene en cuenta ciertos factores como es la velocidad, el rango y su durabilidad que pueden minimizar la precisión. A su vez se tiene la capacidad de tener una memoria suficiente para almacenar coordenadas y calcularlas, sea el grado que gire o rodee el vehículo su precisión de localización no cambia a la distancia original.

2.1.3.Bluetooth

Bluetooth es una tecnología para el uso de redes inalámbricas de área personal (WPAN), que se encuentra habilitado en la gran mayoría de dispositivos ubicuos, de bajo costo, potencia y tamaño pequeño (Rida, Liu, Jadi, Algawhari, & Askourih, 2015). Es una solución dedicada a los sistemas de localización, pero con ciertas dificultades en el posicionamiento de dispositivos, debido al incremento de la latencia en tiempo real de 10 a 30 segundos y el consumo de energía (Farid, Nordin, & Ismail, 2013).

Dentro de este contexto se ha desarrollado diferentes esquemas, así, por ejemplo, el trabajo propuesto por Rida en (Rida, Liu, Jadi, Algawhari, & Askourih, 2015), presenta un sistema de localización en ambientes internos, basado en el RSSI, a través de la tecnología Bluetooth de baja energía (Bluetooth Low Energy, BLE) 4.0; donde diferentes nodos son ubicados de manera equidistante, con una emisión de señal periódica, a esto se le suma el algoritmo de trilateración. Los resultados obtenidos cuentan con un error de aproximadamente de 0.5 a 1 metro de distancia.

Otro ejemplo se expone en (Aman, Jiang, Quint, Yelamarthi, & Abdelgawad, 2016), donde la microlocalización basada en RSSI, a través de la tecnología BLE hace uso de un método computacional. A partir de los valores obtenidos se realiza un procesamiento, donde la mayoría de los resultados logran tener un error de precisión de menos de 1 metro.

2.1.4.FM

El uso de la Modulación de Frecuencia (FM) para los sistemas de localización, ha recibido varios estudios debido a las frecuencias significativamente bajas (100 MHz), que no afecta en condiciones climáticas y menos aún la pérdida de señal en la penetración de paredes (Popovtsev, Osman, & Mayora, 2012). Además de ser señales susceptibles a la presencia humana y al multipath, también minimiza con el tiempo de experimentación. Sin embargo, esta tecnología cuenta con una precisión baja en ambientes externos, esto desalienta la investigación en FM.

Ferreira et al. (2015), presenta secuencias perfectas mediante algoritmos genéticos que se encuentran presente en sensores fijos, que permiten la precisión de la estimación de localización. Es decir que con el uso de una nueva familia de códigos OPDG (Orthogonal Perfect DFT Golay) y una red de sensores distribuidos TDM-CDMA (Time Division Multiplexing-Code Division Multiple Access) con modulación FM, ha minimizado el error de estimación de localización, debido a la inmunidad a la interferencia multipath.

2.1.5.Híbrido

Los sistemas de localización hibrida, cuentan con la combinación de varias tecnologías en sistemas de posicionamiento interno que complementan y mejoran la precisión.

Hybrid Localization of an Emitter by Combining Angle-of-Arrival and Received Signal Strength Measurements (Chan, Chan, Read, Jackson, & Lee, 2014), la fusión del RSS y la técnica ángulo de llegada (Angle of Arrival, AoA), permite mejorar la precisión de la localización mediante un conjunto de ecuaciones lineales, que logra combinar para su solución los mínimos cuadrados ponderados, donde los resultados muestran que esta técnica mejora óptimamente con respecto al único uso de la tecnología AoA o RSS.

2.2. Vehículo Aéreo no Tripulado

Los UAVs son el claro ejemplo de tecnología emergente, aprovechados en respuesta a necesidades militares, públicas y civiles.

Inicialmente, Elmer Ambrose Sperry fue la primera persona en abordar el diseño de un avión no tripulado con estabilización automática, control remoto y navegación autónoma. No fue hasta la primera Guerra Mundial en 1917 que los UAVs fueron dispositivos introducidos por los EE. UU. (Valavanis, 2008). Desde entonces se registró diferentes investigaciones con el uso de estos prototipos conocidos en un principio como vehículos pilotados remotamente

(Remotely Piloted Vehicle, RPV). Sin embargo, a principios de los 90s el término RPV fue cambiado por UAV que entró en uso general, para la descripción de aviones robóticos, usados durante la guerra de Vietnam y posteriormente (Newcome, 2004).

Los UAVs se caracterizan por su alta velocidad, con la capacidad de ser controlados en entornos dinámicos y complejos. Es posible mencionar diferentes desafíos, sin embargo, la comunidad científica ha concentrado su investigación en la interferencia de comunicación aérea al aumentar su trayectoria de vuelo, esto perjudica su operación y evaluación de esquivar obstáculos al igual que el envío y recepción de datos. A continuación, se describe dos diferentes aplicaciones que hacen uso de los UAVs en diferente ambientes y situaciones.

Hawk-An Unmanned Mini-Helicopter-Based Aerial Wireless Kit for Localization (Liu, Chen, Liu, Cao, & Fu, 2014), es un mini helicóptero no tripulado programable, que permite la localización de dispositivos ubicuos en espacios 3D, a través de señales inalámbricas enviadas periódicamente. HAWK cuenta con un sniffer inalámbrico totalmente portátil, con un GPS que muestra un mapa geográfico de los puntos de acceso inalámbrico o enrutadores encontrados. Este vehículo logra posicionar los teléfonos activos en complejos ambientes de tráfico a 5 metros de promedio.

2.3. Sistemas de Posicionamiento – UAV

En los últimos años se ha incrementado la demanda de UAVs en ambientes internos y externos, debido a la integración de dispositivos en un drone como cámara, escáner láser o sensores, a esto se le puede complementar algoritmos de localización y mapeo en tiempo real a través de antenas direccionales, sensores o módulos que presenten navegación simultánea.

Sin embargo, varios sensores o algoritmos pueden provocar retraso e incluso pérdida de información, a continuación, las siguientes aplicaciones presenta el diseño y desarrollo de diferentes prototipos que cuentan con el dispositivo UAV al igual de sensores y módulos que permiten el monitoreo y localización de objetos.

Huh (2013), expone la integración de diferentes tecnologías al UAV, como son el sensor de navegación, una cámara, un escáner láser y un sensor inercial; esto permite estimar la ruta del vehículo y formar un mapa en el espacio donde no ingresa señal del GPS. El escáner láser bidimensional y la cámara cuentan con diferentes características para los métodos de detección, rango o precisión, que trabajan en conjunto para extraer puntos característicos del entorno. Para estos resultados se desarrolló algoritmos de estimación de navegación en tiempo real basado en

el algoritmo EKF SLAM³, combinado con las características de la imagen extraída por el vehículo. Los resultados dan estados estimados que comparan la trayectoria considerada con la del GPS, esto dio una precisión de menos de 1 metro.

2.4. Aplicaciones Comerciales

En el área comercial existe pocos sistemas de localización para ambientes internos, por el contrario, en ambientes externos la demanda de aplicaciones se ha incrementado excesivamente, por este motivo la siguiente información describe los sistemas que han causado commoción en el presente. Además de presentar prototipos que han revolucionado el campo de los UAVs.

2.4.1. Pozyx

Un ejemplo de un sistema de localización comercial es Pozyx (Van de Velde, Vermeiren, & Verheyen, 2015). Solución asequible presentada al mercado en el 2015, que permite precisar la localización en ambientes internos y externos, a través de la tecnología de Banda Ultra Ancha (UWB), que penetra 1 o 2 paredes gruesas de concreto. Además de estar equipado con sensores de movimiento como un acelerómetro, giroscopio, magnetómetro y presión (ver Figura 2.1).



Figura 2.1. Sistema de Localización Pozyx
(Van de Velde, Vermeiren, & Verheyen, 2015)

El sistema Pozys cuenta con al menos 5 módulos para la localización 3D, 4 de ellos trabajan como anclajes y un módulo como etiqueta que desea conocer la posición. Este último es usado en el cálculo de ubicación en ambientes internos. Su error de posicionamiento es de alrededor de 10 cm.

³ EKF SLAM: representa la incertidumbre del estado por una media aproximada y varianza (Bailey, Nieto, Guivant, Stevens, & Nebot, 2006).

2.4.2.IndoorAtlas

Otro ejemplo de sistemas de localización es IndoorAtlas (Thompson, 2017), que utiliza tecnología geomagnética a través de una plataforma basada en la nube, que permite escalar de manera rentable y ubicua. Además de un algoritmo patentado que fusiona varios sensores, es decir que la aplicación necesita que el dispositivo móvil cuente con una brújula, un giroscopio y un acelerómetro.

IndoorAtlas es una aplicación amigable con el usuario, que permite ser programada a través del SDK, donde el usuario puede cargar un mapa y recopilar los datos que captura los sensores que genera un mapa de campo magnético. Una vez generado el mapa la aplicación tiene una precisión en ambientes internos de al menos 1 a 2 metros, debido a que precisa de suficientes estructuras de acero como se observa en la siguiente Figura 2.2.

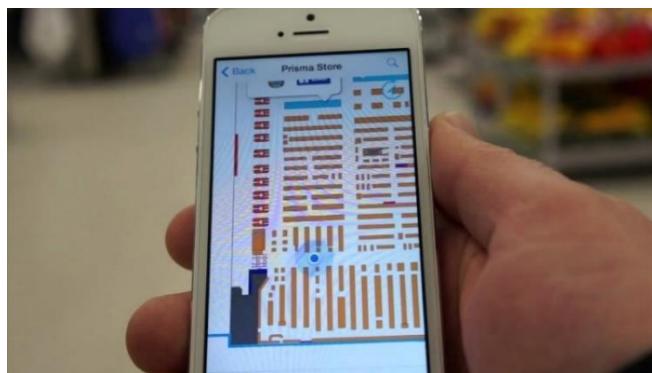


Figura 2.2. Aplicación IndoorAtlas
(IndoorAtlas, 2014)

2.4.3.Nextome

Nextome (Dentamaro, Colucci, & Giangiuseppe, 2017), es un sistema comercial con más de 4 años de investigación, basada en la tecnología Bluetooth 4.0 BLE mediante la infraestructura iBeacons o Eddystone Beacon, que es compatible en ambientes internos. Sin embargo, este sistema cuenta con un algoritmo optimizado que usa inteligencia artificial para receptar, categorizar, analizar señales y con esto identificar la posición del usuario. Esta última característica se debe a que la aplicación puede elegir automáticamente la tecnología Nextome o Google Maps.

La tecnología Nextome tiene una escalabilidad ilimitada debido al uso de teléfonos inteligentes, que logran realizar el cálculo de posición. A esto se le suma la navegación contextual que brinda información de las colecciones o servicios de un lugar (ver Figura 2.3). Los resultados obtenidos en la precisión de localización fueron en el rango de 1.5 a 2 metros sin necesidad de conectarse a la red.

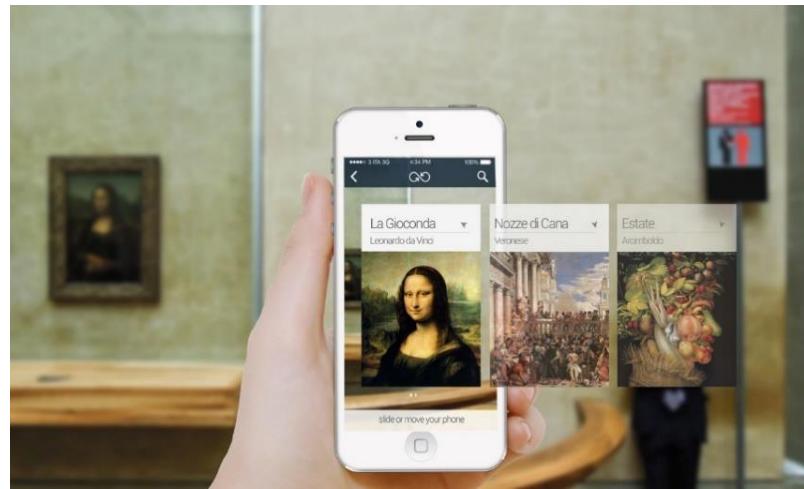


Figura 2.3. Tecnología Nextome
(Dentamaro, Colucci, & Gianguseppe, 2017)

2.4.4. Wifarer

Wifarer es un sistema comercial líder en posicionamiento y navegación en ambientes internos (Wifarer, 2017), que realiza el escaneo fingerprint de todas las redes Wi-Fi o BLE. A esto se le suma los algoritmos de posicionamiento optimizado, que proporcionan la navegación en interiores desde la ubicación actual hasta su destino, el tiempo de viaje, la distancia y caminos alternos de acuerdo con el usuario que lo utilice. Esta aplicación puede estar disponible en dispositivos inteligentes que cuente con un magnetómetro o brújula, sin contar que su SDK funciona tanto en Android como en iOS (ver Figura 2.4).



Figura 2.4. Sistema Comercial Wifarer
(Fingerprints, 2017)

Este sistema cuenta con la mejor precisión en el posicionamiento de interiores, sin embargo, puede llegar a tener error en la localización debido a la cantidad elevada de redes Wi-Fi y BLE que están presentes en áreas internas.

2.4.5.YooBee

YooBee es un sistema utilizado en el posicionamiento preciso de espacios internos, mediante la agrupación de sensores, que puede el usuario llegar a incrementar nuevos sensores en el área que requieren mejor y mayor precisión. Dichos sensores pueden emitir señales de radiofrecuencia BLE, e incluso lograr aprovechar la infraestructura existente tanto para iBeacons como Wi-Fi (Callaerts, Deforche, & Dumon, 2017).

Esta aplicación cuenta con la capacidad de soportar simultáneamente smartphones⁴, compatibles con Android o iOS como se muestra en la Figura 2.5, que a su vez aprovechan y utilizan señales de una red de área local inalámbrica (WLAN) y Bluetooth optimizando la precisión del sistema.



Figura 2.5. YooBee Smartphones con Android o iOS
(Callaerts, Deforche, & Dumon, 2017)

La presente tecnología cuenta con una alta precisión del 80% de las mediciones, dentro del rango del 1 metro. YooBee cuenta con hardware y software de bajo costo, donde no se usa cableado, sin calibración o fingerprinting (ver Figura 2.6). A pesar de todo ello es un sistema que brinda su localización tanto en dirección como orientación, que da toda información de lo que el usuario se encuentra observando.

⁴ Smartphone: Teléfono inteligente.



Figura 2.6. YooBee-Hardware
(Callaerts, Deforche, & Dumon, 2017)

2.5. Síntesis

Las soluciones presentadas tanto comercial como investigativa, muestran tecnologías, algoritmos y dispositivos, que interactúan de diferente manera, esto permite optimizar la localización tanto de dispositivos como usuarios. No obstante, dicho estudio ha demostrado que el uso de ciertas tecnologías permite dar respuesta al problema planteado en el presente proyecto.

Los sistemas de localización tanto en ambientes internos como externos han sido estudio y discusión de los últimos años, sin embargo, deja un espacio a soluciones futuras. El tema permite la mejora de un algoritmo, que obtiene datos con un mínimo de error, esto logra generar un sistema rentable, por medio de dispositivos inteligentes.

A este contexto se le añade la movilización de un vehículo aéreo, por medio de diferentes tecnologías disponibles, que a través del estudio e investigación se puede combinar el posicionamiento de objetos con la autonomía de un vehículo. El análisis y desarrollo de este sistema se encuentra disponible en los siguientes capítulos, con su respectiva justificación.

3. Terminología y Conceptos

El presente capítulo forma parte de la fase Base de Conocimiento de la metodología DS, que describe las tecnologías, métodos y técnicas que fundamentan el desarrollo del sistema de posicionamiento, para la localización de dispositivos en estado dinámico y estático en ambientes internos y externos.

3.1. Ingeniería de Software

La Ingeniería de Software tiene varios conceptos, uno de ellos y con mayor significado ha sido elaborada por la IEEE, que lo determina como: “La aplicación de un enfoque sistemático, disciplinado y cuantificable al desarrollo, operación y mantenimiento del software; es decir, la aplicación de la ingeniería de software” (IEEE, 1993).

Inicialmente ingeniería de software fue propuesta en 1968, en una conferencia que se le denominó “Crisis del Software”, debido al ingreso de computadoras basadas en circuitos integrados (Braude & Bernstein, 2016). A partir de esta fecha se generó nuevas técnicas y métodos que controlan sistemas de gran magnitud, que dan lugar a la optimización considerablemente del software. (Sommerville, 2005) Esto formó diferentes enfoques, entre ellos es la de Sommerville que expone que “La Ingeniería del Software es una disciplina de la ingeniería que comprende todos los aspectos de la producción de software, desde las etapas iniciales de la especificación del sistema, hasta el mantenimiento de éste después de que se utiliza”.

En otras palabras, Ingeniería de Software es una disciplina de la ingeniería que engloba todos los aspectos de producción de software, además de comprender desde procesos técnicos hasta la gestión del software, a través de un enfoque sistemático y organizado que garantiza una buena calidad (Braude & Bernstein, 2016). En la siguiente Figura 3.1 se presenta 4 estratos que permiten el desarrollo del software (Pressman, 2005).

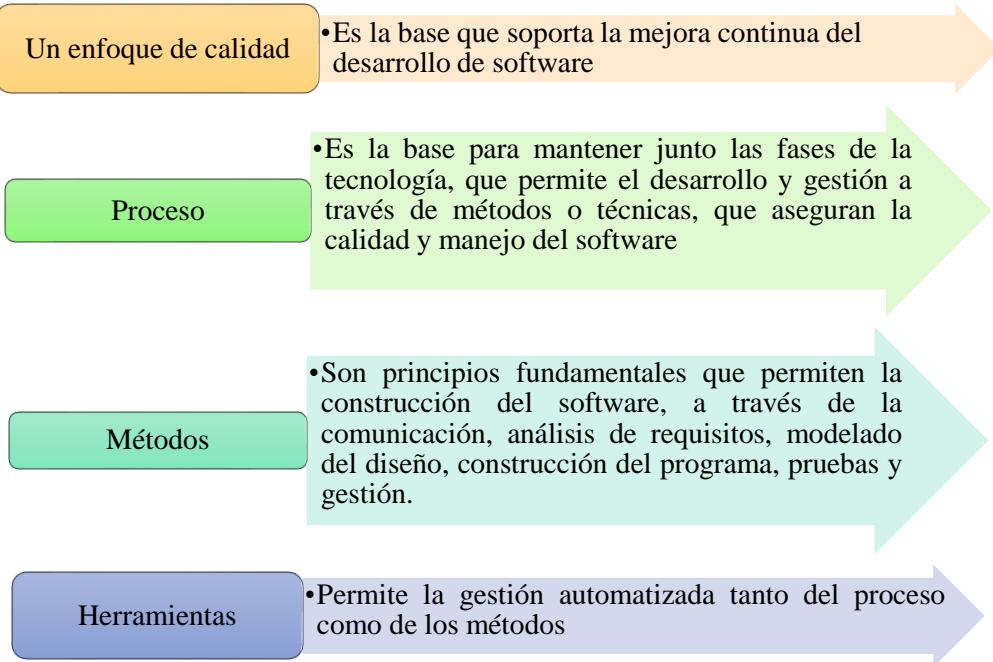


Figura 3.1. Estratos para la Ingeniería de Software

El presente proyecto hace uso de la metodología denominada Ciencia del Diseño, debido a la investigación fundamental a la tecnología de la información, que permite direccionar el desarrollo de un artefacto.

3.2. Metodología DS

Esta metodología emerge a mediados de los 70s, a partir de esta fecha la Universidad Carnegie Mellon decide avanzar con esta investigación. A través de los años varios científicos concentraron sus estudios a esta metodología, un ejemplo de ello fue Simon (1996), que anuncio “El paradigma de la ciencia del diseño tiene sus raíces en la ingeniería y las ciencias de lo artificial” (Simon, 1996).

A partir de esta fecha se expuso diferentes puntos de vista, sin embargo, no fue hasta 2004 que Hevner et al. expuso una investigación completa que describe el desarrollo de la ciencia del diseño en Sistemas de Información, mediante una lista de directrices, que dan lugar a la ejecución del artefacto (Hevner, March, Park, & Ram, 2004).

3.2.1. Definición

Es el diseño e investigación de artefactos exitosos, que permite describir diferentes metodologías, para la investigación científica de diseño e ingeniería del software. Los artefactos son diseñados para interactuar con un problema y mejorar algo en el entorno (ver Figura 3.2).

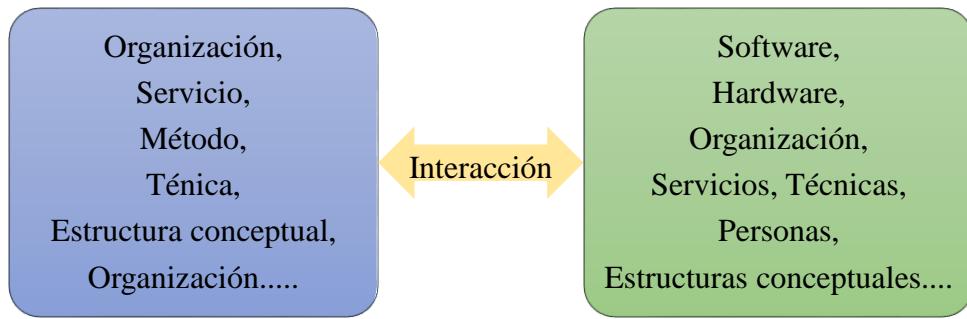


Figura 3.2. DS: Interacción Artefacto-Entorno

La Figura 3.2 muestra que el artefacto no resuelve ningún problema, en otras palabras, la interacción entre el artefacto y el entorno permite resolver el problema. No obstante, el artefacto puede interactuar de manera diferente en otros ambientes, esto logra solucionar o crear obstáculos en metas de otro contexto (Wieringa, 2014).

Los problemas de investigación en ciencia del diseño (Research in Design Science, DSR), se enfocan principalmente en el diseño e investigación, que cuentan con dos tipos de inconvenientes:

- Problemas de diseño: es necesario dar una o varias soluciones al problema del entorno, a través de un análisis de objetivos reales e hipotéticos,
- Preguntas de conocimiento: no obliga un cambio al mundo, sino respuesta sobre el artefacto en el entorno.

En conclusión, DSR sustenta el paradigma de la investigación pragmática que permite la elaboración de un artefacto que resuelve los problemas del entorno (Shrestha, Cater-Steel, & Toleman, 2014). La metodología de investigación de ciencia del diseño (Design Science Research Methodology, DSRM) incorpora principios, prácticas y procedimientos que permite a cabo la investigación y así cumplir con tres objetivos:

- Estado del arte consistente,
- Brindar un modelo de proceso para la investigación de DS,
- Definir un modelo mental para la presentación y evaluación DSR (Peffers, Tuunanen, Rothenberger, & Chatterjee, 2007)

3.2.2. Principios

Según Hevner et al. (2004), DSRM cuenta con diferentes directrices o principios que

desarrollan una framework, usado en la evaluación del proceso de diseño. Estos requisitos requieren de investigación detallada en la creación de un artefacto. A continuación, en la Tabla 3.1 se expone las diferentes directrices (Wieringa, 2014) (Hevner, March, Park, & Ram, 2004).

Tabla 3.1. Directrices de la Investigación de Ciencia del Diseño

Directrices	Definición
1 Diseño como un artefacto	Creación de un artefacto mediante un modelo, método o construcción.
2 Relevancia del problema	Desarrollar diferentes soluciones que estén basadas con la tecnología.
3 Evaluación del Diseño	Demostrar a través de la evaluación la calidad, eficiencia y utilidad de un artefacto.
4 Contribución	Brindar aportaciones significativas que sean claras y viables en el diseño del artefacto.
5 Rigor en la investigación	Implementación de métodos y técnicas en la creación y evaluación del artefacto.
6 Diseño como una investigación de proceso	Buscar un artefacto que llene los objetivos deseados que soluciones los problemas del entorno.
7 Comunicación de la investigación	Presentación del artefacto a diferente público que este orientada a la tecnología y también a la gestión.

3.2.3. Framework y Ciclos DSR

La Figura 3.3, muestra los tres ciclos de investigación científica de diseño, que es similar a la framework mostrada por Hevner et al., por otra parte, cuenta con la separación tanto del diseño como el de investigación (Hevner A. R., 2007). Se puede tener una idea clara de esto a través de la existencia de los ciclos:

- Ciclo de Relevancia: Une el entorno contextual de la investigación con las diferentes actividades que engloba la DSR. En otras palabras, se inicia el DSR con una aplicación de contexto, por medio de la definición de requisitos y criterios para la evaluación final de los resultados;
- Ciclo de Rigor: Las actividades del DSR se conecta con los conocimientos base (fundamentación, experiencia y metodología), que permite mostrar el proyecto de

investigación; es decir, proporciona conocimientos previos para garantizar que las contribuciones del diseño sean óptimas y no una rutina basada en la aplicación de procesos conocidos;

- Ciclo de Diseño: Las actividades de construcción y evaluación se juntan con el proceso de diseño e investigación. Es la parte primordial del proyecto, debido a que forma parte de las actividades de la construcción, evaluación y retroalimentar, para que el artefacto tenga un final satisfactorio.

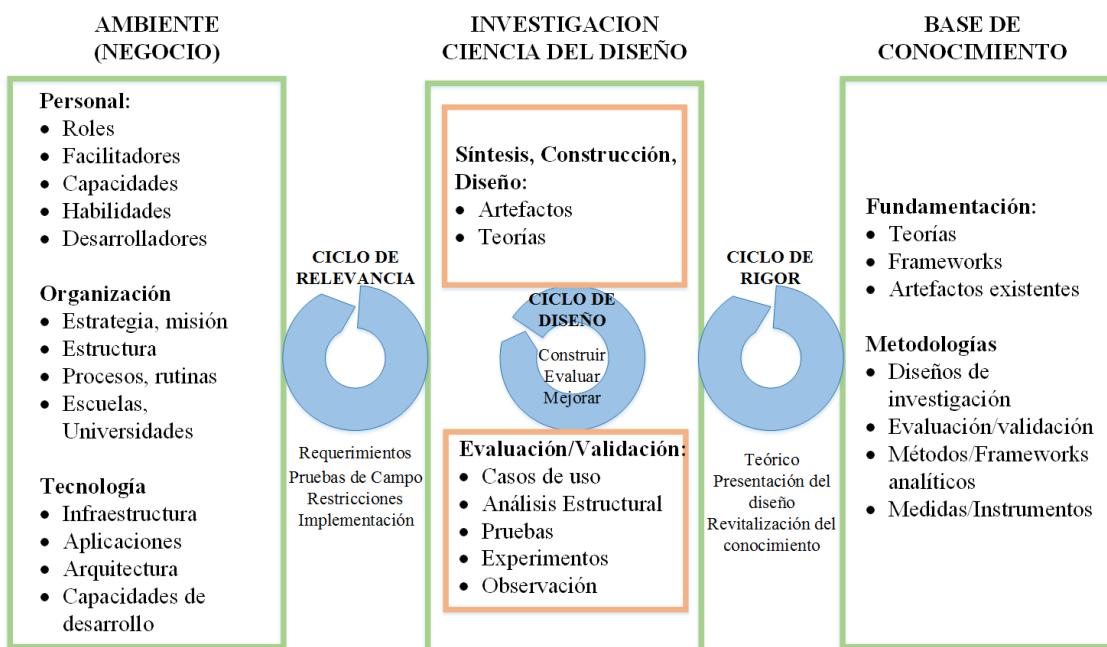


Figura 3.3. Framework-Investigación Ciencia del Diseño
(Hevner, March, Park, & Ram, 2004) (Hevner A. R., 2007)

3.2.4. Metodología DS en el desarrollo de este trabajo

Esta metodología se preocupa especialmente en el diseño y desarrollo de artefactos con el objetivo de mejorar el entorno y poder ser partícipe de otros artefactos.

Para garantizar la eficiencia de este proyecto se utiliza la metodología DS, ya que está conformado por directrices que permiten encontrar y fundamentar teorías y artefactos ya existentes, que da lugar al diseño y construcción de un sistema mediante técnicas y herramientas diferentes, que se valida a través de múltiples evaluaciones en varios entornos. Finalmente, este proyecto será presentado para su conocimiento a través de un documento y tres notas previas.

3.3. Ondas Electromagnéticas

Las Ondas Electromagnéticas son aquellas que viajan sin un medio de comunicación, es decir

que no cuenta con la necesidad de un sólido, fluido o aire para el envío de información de un lugar a otro. Ellas se forman a través de la oscilación de electrones de un átomo, que cuentan con un componente eléctrico y magnético y oscilan en diferentes planos respectivamente. Las ondas electromagnéticas se propagan hacia fuera de la fuente (ver Figura 3.4), perpendicularmente a la dirección del recorrido de la onda, con la característica que viajan a la velocidad de la luz aproximadamente 300 millones de metros por segundo. Las ondas electromagnéticas cuentan con rayos infrarrojo, ultravioleta, rayos X, gamma, ondas de radio y microondas (Wait, 2013).

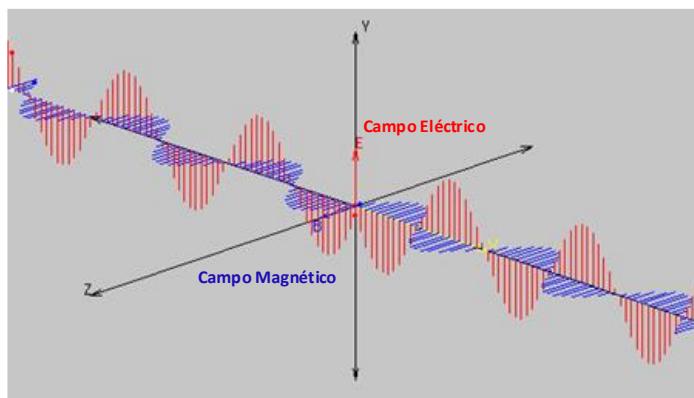


Figura 3.4. Ondas Electromagnéticas
(Arzayús, 2007)

La señal emitida por un emisor puede contener información o datos que son recibidas por el receptor y a la vez decodificar la señal con la información, esto se logra sin necesidad de elementos físicos. Sin embargo, en el aire viajan diferentes tipos de ondas, la única forma de diferenciar es a través de su frecuencia. A estas frecuencias se le ha buscado aplicaciones distintas que permiten el desarrollo tecnológico. Las ondas electromagnéticas que ha logrado un impacto profundo en el mundo actual son las ondas de radio, que por medio de ellas se ha desarrollado la comunicación inalámbrica y con eso el soporte fundamental a las telecomunicaciones (Wait, 2013).

3.3.1. Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell deducen la existencia de las ondas electromagnéticas, debido al vínculo entre los campos eléctricos y magnéticos, es decir satisfacen la intensidad de campo eléctrico \vec{E} y la inducción magnética \vec{B} , que son campos vectoriales dependientes del tiempo (Temes, 2001). Maxwell junta diferentes ecuaciones que predicen la existencia de dichas ondas, sin embargo, en 1887 H. Hertz es quien genera y detecta las ondas electromagnéticas, además de contribuir a la formulación de las mismas. A estas ecuaciones se les denomina como

fenómenos electromagnéticos:

Ley de Ampère-Maxwell	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$
Ley de Faraday-Lenz	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
Ley de Gauss (campo eléctrico)	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$
Ley de Gauss (campo magnético)	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$

Ecuación 3.1. Ecuaciones de Maxwell

A continuación, se define las unidades de las ecuaciones anteriores (Ferrando & Valero, 2007), donde:

\vec{H}	Intensidad del campo magnético	\vec{J}	Densidad de corriente libre
\vec{E}	Intensidad del campo eléctrico	\vec{B}	Densidad de flujo
\vec{D}	Densidad de flujo eléctrico	ρ	Densidad volumétrica de cargas libres

3.3.2. Sensores Inalámbricos

Los sensores inalámbricos (Wireless Sensors, WS) o también denominados nodos, son tecnología que ha evolucionado constantemente con la microelectrónica, la computación y las telecomunicaciones. WS es un circuito electrónico (Villaseñor, Galindo, & Jiménez, 2007), que está formado de 3 partes:

- Un microcontrolador: es el dispositivo indispensable de este circuito, ya que por ser programable tiene la capacidad de controlar a los otros dos módulos.
- Un transceptor de radiofrecuencia: es el componente que recibe y transmite datos, a través de una técnica de modulación.
- Un sensor integrado: es aquel aparato que permite el registro de una variable física y la convierte en dato, para ser entregado al transmisor por medio del microcontrolador.

Estos sensores cuentan con diferentes beneficios de uso (Omega, 2017), los principales son:

- Seguridad: Los módulos inalámbricos tienden a ser utilizados en lugares de difícil acceso, a través de ellos se puede supervisar procesos en ambientes de peligro y reportar datos al usuario a una distancia segura.

- Comodidad: Los sensores inalámbricos forman una red que permite el control y monitorización de un ambiente, en tiempo real y de forma remota a partir de una estación base.
- Disminución de costos: Se refiere a la disminución de materiales no necesarios para la transmisión de datos, además de los accesorios y conductos.

Los sensores inalámbricos al ser usados en diferentes circunstancias cuentan con características primordiales, que son consideradas en distintos proyectos de medición inalámbrica. (ver Figura 3.5)

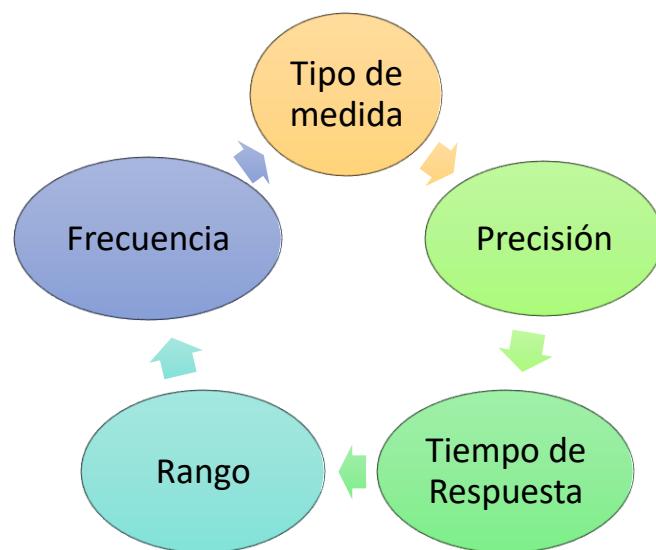


Figura 3.5. Características-Sensores Inalámbricos

3.4. Redes de Sensores Inalámbricos

Las redes de sensores inalámbricos, también conocidos como Wireless Sensor Networks (WSNs), son colecciones distribuidas de pequeños nodos conectados por medios inalámbricos con capacidad limitada. Estos nodos son representados por sensores con diferentes capacidades con fines de monitoreo, vigilancia, seguimiento, búsqueda y rescate (Kuo, Chen, Cheng, & Lu, 2016). Además de ello permite el control de distintas condiciones como es la temperatura, presión, movimiento, sonido, entre otras. A menudo el problema que presenta este tipo de tecnología es la limitación de la batería, cantidad redundante de datos e interferencia.

Su principal arquitectura consta de un nodo central y un arreglo de nodos de sensores distribuidos en el espacio. Cada nodo cuenta con funcionalidades diferentes, un ejemplo de ello es el nodo central que tiene mayor capacidad de procesamiento y memoria, por el contrario, el resto de nodos tienen una potencia y capacidad de procesamiento limitada. Cada uno de ellos

debe estar consciente de su posicionamiento, e incluso proporcionar su ubicación e información recolectada y realizar funcionalidades de red, debido a que no se tiene un número específico de sensores y la estación base no cuenta con la capacidad de posicionar cada uno de ellos. Por lo general los nodos se comunican con el nodo central mediante múltiples saltos, bajo condiciones de canal no ideal que proporciona la ubicación exacta del usuario (Garg & Jhamb, 2013)

3.4.1. Características en Redes de Sensores Inalámbricos

De acuerdo con el contexto anterior, los WSNs brindan la posibilidad de desarrollar incontables aplicaciones, que permiten supervisar diferentes fenómenos. Dichas redes adoptan una serie de características propias, indispensables para su diseño tanto de protocolos como de algoritmos (Villalba, 2015), y así garantizar su calidad. A continuación, se describe los requisitos de mayor importancia:

- Limitación de recursos: A lo largo de los años se ha logrado un avance microelectrónico en los WSNs, sin embargo, poseen algunas limitaciones que se relacionan directamente con el tamaño y la energía, como son: el ancho de banda, el procesamiento y el almacenamiento de información. La solución es el uso de hardware sencillo que se ajuste al consumo de potencia, que puede ser extraído del entorno existente (Villalba, 2015).
- Costes de producción: Comúnmente los WSNs constan de un número elevado de nodos, que permiten obtener datos con gran precisión. Sin embargo, en ocasiones el coste de la red depende del coste del nodo, por ser considerado barato el coste de cada sensor debe ser bajo en precio toda la red (Pérez, Urdaneta, & Custodio, 2014).
- Topología y entornos de red: Un WSNs puede adaptarse a diferentes tipos de topologías principalmente: estrella, mallada, árbol y una combinación de ellas. A continuación, en la Tabla 3.2 se presenta una comparación de las topologías existentes.

Tabla 3.2. Topologías para un WSN

Topología	Característica
Estrella	Es un sistema con un solo salto, es decir que todos los nodos tienen una comunicación directa hacia el Gateway, denominado nodo central. Este último permite enviar datos a una fuente externa, sin embargo, tiene una gran desventaja si uno de los nodos sufre un fallo, se lo llega a considerar recurso perdido por no contar con un camino alterno (ver Figura 3.6-a).

Árbol	Es un sistema donde los dispositivos enrutadores se comunican tanto con los nodos finales como el Gateway (ver Figura 3.6-b), es decir que es el enrutador de datos entre los miembros y el coordinador de la red.
Mallada	Es un sistema multisalto, donde cada nodo tiene la capacidad de receptar y transmitir información de nodo a nodo e incluso al Gateway. Cuenta con una gran tolerancia a errores, ya que presenta diferentes caminos de comunicación al nodo central, debido a la implementación de los protocolos de enrutamiento como se observa en la Figura 3.6-c.

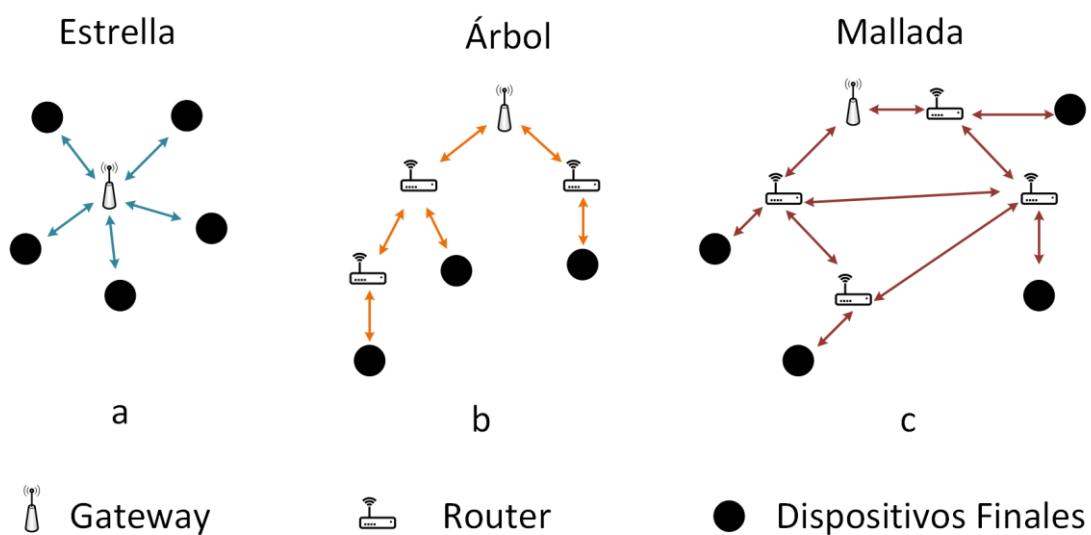


Figura 3.6. Topologías de red

Las topologías de una red de sensores inalámbricos hacen frente a diversos cambios, ya que no cuentan con la necesidad de usar una infraestructura de red fija, más bien deben contar con diseños que pueden ser sometidos a trabajar y adaptarse en diferentes condiciones y entornos peculiares (Hernández, 2010).

- **Tolerancia a errores:** Los nodos sensores de una red pueden presentar fallas tanto por falta de energía como problemas físicos. Al producirse un daño en uno de los sensores, la red debería seguir con una función normal sin interrupciones en el sistema propio. El nivel de tolerancia a fallos depende de la aplicación y el diseño del WSN (Villalba, 2015).
- **Medio de transmisión:** Los WSNs se comunican mediante enlaces inalámbricos como RF, radio infrarrojo o ultrasonido. Cada uno cuenta con características propias que pueden ser sensibles a la pérdida, limitación o retardo de la señal como es el caso de las tecnologías infrarrojo y ultrasonido. Por el contrario, las comunicaciones RF son las de mayor uso a nivel mundial, por contar con ondas con la capacidad de atravesar objetos,

edificaciones e incluso seres humanos; por esta razón la presente investigación centra su estudio en esta tecnología, ya que cuenta con características esenciales presentes en el diseño de este sistema (Pérez, Urdaneta, & Custodio, 2014).

- Consumo de energía: Los nodos de las WSN están equipados por baterías de carga limitada que dan lugar a un diseño distinto de la red que logra dependencia de la fuente energética. Un nodo tiene la capacidad de gastar la energía en gran medida en su comunicación, específicamente en la recepción más que en la transmisión de datos. El procesamiento de los datos consume energía en menor medida. Las baterías usadas en mayor cantidad son baterías primarias (energía para electrodomésticos habituales) o secundarias (baterías recargables) (Villalba, 2015).
- Escalabilidad: Las WSNs deben estar diseñados para trabajar con cientos o miles de nodos, de esta manera adaptarse y trabajar en nuevos esquemas, entornos y aplicaciones.

3.4.2. Arquitectura de un WSN

En esta sección se encuentra definida como una red de sensores inalámbricos es conformada por diferentes dispositivos como son: nodos sensores, Gateway y una estación base (ver Figura 3.7). Se hace mención para una mejor comprensión de los componentes, que son utilizados en el presente proyecto, posteriormente son descritos en el presente capítulo y CAPITULO 4.

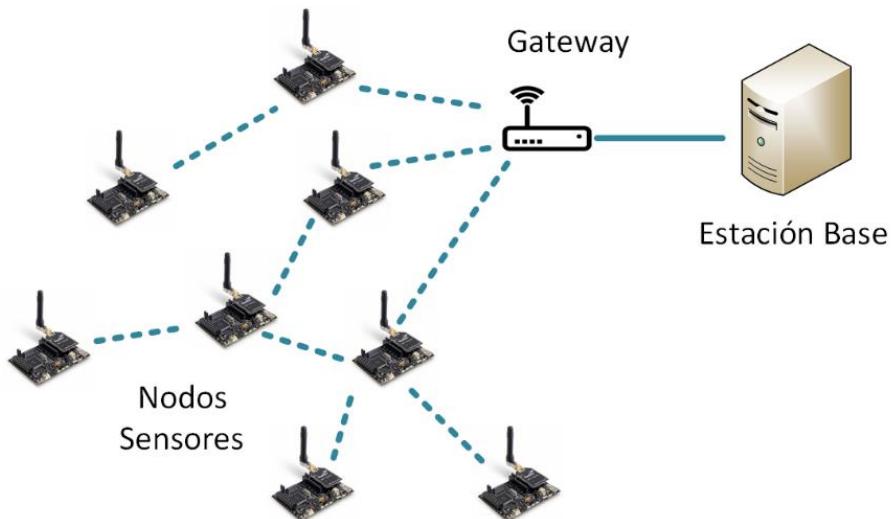


Figura 3.7. Elementos de un WSN

En la Figura 3.7 se observa un ejemplo de cómo una red con sensores inalámbricos puede estar dispersa de forma ad-hoc en un área determinada, donde sus nodos tienen una igualdad de rango. Para las diferentes aplicaciones se utiliza un modelo diferente, donde las mediciones tomadas deben coincidir con la información digital tomada, estos datos deben ser enviadas a un

componente con mayor capacidad y ser analizado (Martínez, Meré, de Pisón Ascacíbar, Marcos, & Elías, 2009).

3.4.2.1. Nodos Sensores

Un nodo sensor es característico por su tamaño, con la capacidad de receptar, procesar y transmitir a otro destinatario información del entorno en donde se encuentre. Este nodo está compuesto por varios elementos entre los cuales se tiene (ver Figura 3.8).

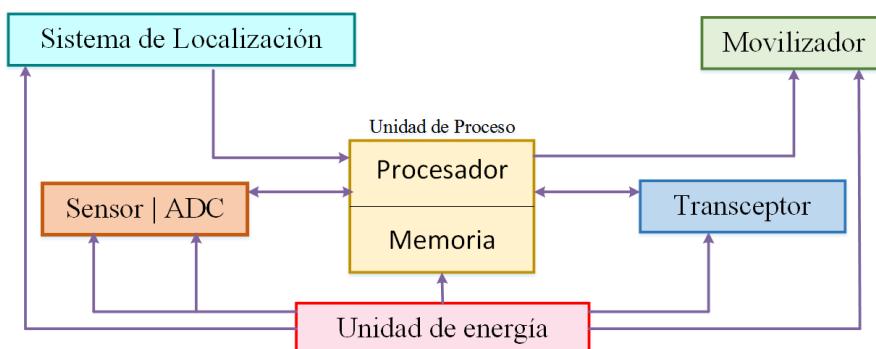


Figura 3.8. Elementos de un Nodo Inalámbrico
(Villalba, 2015)

La Figura 3.8 muestra los elementos principales en un nodo, cada componente puede tener variabilidad como los sensores, actuadores, antena o fuente de energía (Villalba, 2015). A continuación, una breve explicación de los diferentes elementos.

- **Transceptor:** Es un circuito que genera una señal de radio frecuencia desde una banda base digital y viceversa.
- **Procesador:** Elemento denominado como microcontrolador (Microcontroller Unit, MCU), que interpreta y procesa la información recolectada para transmitirla a otro dispositivo. Está conformado por una unidad de proceso, memoria e interfaces de entrada/salida.
- **Sensores:** Dispositivos que generan datos medibles ante un estado físico, en el área que se encuentra motorizada. Las características de un sensor son: el tamaño, consumo bajo de energía, autónomo, adaptación a cualquier ambiente u operaciones con densidades volumétricas (Martínez, Meré, de Pisón Ascacíbar, Marcos, & Elías, 2009). Los sensores están clasificados en tres tipos: (i) Pasivos unidireccionales, dirección definida; (ii) Pasivos omnidireccionales, no existe conocimiento de dirección y captan datos sin manipular el entorno; (iii) Activos, sondean el ambiente a través de ondas expansivas.

- **Memoria:** Existen diversas clases como: la memoria integradas en un microcontrolador y memoria flash. La memoria depende de la aplicación, según la finalidad de almacenamiento: (i) Guardar datos recogidos o (ii) almacenamiento del programa.
- **Unidad de energía:** Dispositivo de almacenamiento de energía, que de acuerdo con la aplicación usada el tiempo de vida será mayor, por este motivo es necesario alternativas que reúnan energía del entorno. Sin embargo, la mayor cantidad de energía consumida es por la transmisión de datos, por el contrario, su procesamiento y sensores tienden a usar menor batería.
- **Elementos adicionales:** Un ejemplo de elemento extra es una antena, que en este caso pueden ser monopolo o antena chip (integrada en una placa de circuito impreso). Sin embargo, en la mayoría de casos se usa la segunda opción por su reducido tamaño y la supresión de usar un conector. Existen otras unidades adicionales que depende de la aplicación como los sistemas de localización, generadores de energía, etc.
- **Movilizador:** Esta encargado de reubicar los nodos en las diferentes actividades.

3.4.2.2. Gateway

Gateway es denominado como puerta de enlace, es considerado también como un nodo especial, porque soporta de dos o más interfaces físicas, permite la interconexión entre la red de sensores y la red de datos. Este dispositivo es elemental porque permite monitorear y acceder a la información de los nodos.

3.4.2.3. Estación Base

Se considera a la estación base, un dispositivo basado en un ordenador o sistema embebido, que recoge información de los nodos, para incorporar a una base de datos, donde los usuarios acceden de forma remota a la información.

3.5. Localización

El término localización cuenta con diferentes sinónimos uno de ellos es geolocalización, detección y el de mayor conocimiento en el mercado posicionamiento. Localización se refiere al proceso de recoger datos, para determinar la ubicación de un objeto con respecto a un conjunto de posiciones, dentro de un entorno definido (Farid, Nordin, & Ismail, 2013). Para este propósito se necesita de diferentes parámetros que son utilizados por las técnicas,

tecnologías y algoritmos de localización, que se coordinan entre ellas para el cálculo de posición, que forman sistemas de posicionamiento a través de aplicaciones ubicom.

Los sistemas de localización son un elemento adicional de los nodos sensores de una red inalámbrica. Estos nodos recogen información medible como los ángulos, velocidades, rangos, distancias, entre otros, que son expuestas a un cálculo de coordenadas de dos o tres dimensiones, que se obtienen de acuerdo con la relación de coordenadas fijas en el mundo real (Axel, 2005).

En las secciones siguientes se describe las configuraciones, técnicas, algoritmos y tecnologías que forman un sistema de localización. Se hace hincapié ciertas características utilizadas para la implementación del presente proyecto.

3.5.1. Localización: representación

Localización es la ubicación de un objeto en cualquier entorno, que puede ser mostrado de forma absoluta, relativa o simbólica. A continuación, se describe las tres formas más comunes de posicionamiento utilizadas en el presente proyecto.

- **Absoluta:** La forma absoluta de localización se refiere a las coordenadas geográficas, que corresponde a los grados de latitud y longitud de un punto en la superficie en la Tierra (ver Figura 3.9).

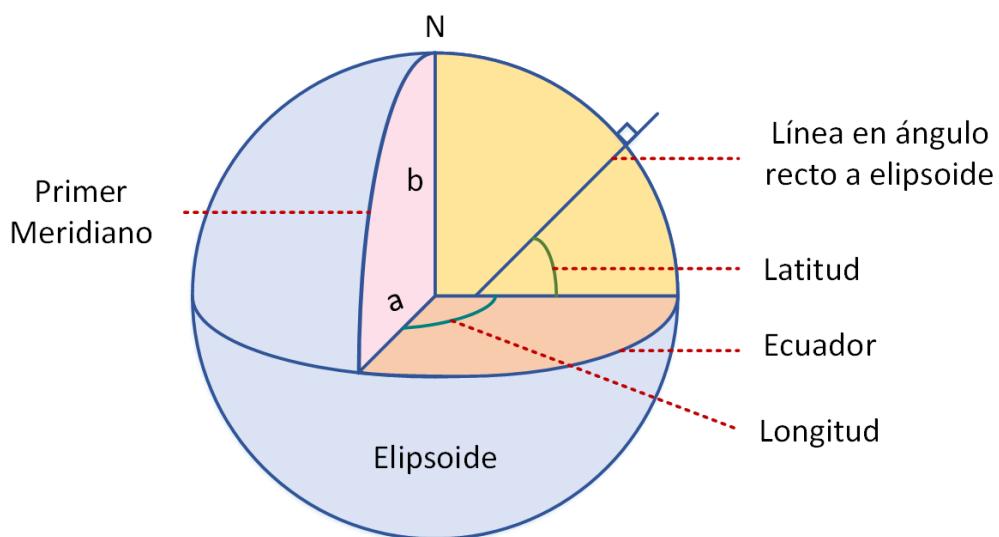


Figura 3.9. Localización: Superficie de la Tierra
(Varshavsky & Patel, 2009)

Tanto la latitud como la longitud cumplen un rol importante en el posicionamiento, por un lado, se tiene la latitud que es el resultado de la medida del ángulo entre la línea ecuatorial y una línea al elipsoide de referencia. Por otro lado, se tiene la longitud, que

es un ángulo a lo largo del ecuador hasta un punto. Un ejemplo es Quito, Ecuador, que tiene una latitud de 0.14° S y una longitud de 78.31° O. Esta forma de representación es comúnmente utilizada en aplicaciones que utilizan la tecnología GPS. Sin embargo, en diferentes aplicaciones causan inconvenientes, ya que muestran una ubicación general del lugar (Varshavsky & Patel, 2009).

- **Relativa:** Esta forma se la denomina relativa, ya que una coordenada geográfica puede ser traducida a una dirección o un lugar simbólico.
- **Simbólica:** Esta forma es usada en la mayoría de sistemas de posicionamiento interno, donde es necesario especificar un punto de inicio de un plano cartesiano, donde se especifica tanto el eje horizontal X como el vertical Y.

3.5.2. Técnicas y Algoritmos de Localización

La combinación de técnicas y algoritmos de localización, permiten determinar la posición de un objeto, con una precisión tanto en ambientes internos como externos. GPS es una tecnología conocida por ser usada en ambientes externos, sin embargo, es poco práctico en cuestiones de batería e incluso de localización, este último se refiere a lugares con poca visibilidad o en entornos internos donde su señal está bloqueada por diversos obstáculos. Por este motivo es recomendable el uso de técnicas que recojan datos con la mayor proximidad a su ubicación. A continuación, se describe las diferentes técnicas existentes, además se profundiza el método y algoritmo de localización utilizada en el presente proyecto.

3.5.2.1. Detección de Proximidad

Este método de localización es uno de los más sencillos, muestra una ubicación simbólica relativa, es decir que se estima la ubicación de un dispositivo con respecto a un punto de referencia. La proximidad puede ser detectada mediante uno o varios puntos de referencias, que pueden ser derivadas de coordenadas encontradas en el rango de la señal, que cuentan con una cobertura limitada, para un mejor resultado de precisión se usa una ponderación de los puntos. Esta técnica puede ser utilizada con tecnologías inalámbricas como IR, RFID o bluetooth.

3.5.2.2. Dead Reckoning

Dead Reckoning es una técnica que permite calcular una posición, que tiene como referencia la última ubicación, a esto se le suma un previo conocimiento de su velocidad, tiempo y dirección transcurrida. Sin embargo, dicho método cuenta con una inexactitud acumulativa, que con el

tiempo aumenta su error de precisión (Varshavsky & Patel, 2009) (Farid, Nordin, & Ismail, 2013). Es decir, las nuevas posiciones dependen de su posición anterior, por tanto, un error en su inicio provoca un error a futuro. A continuación (ver Figura 3.10) presenta un ejemplo base de dead reckoning.

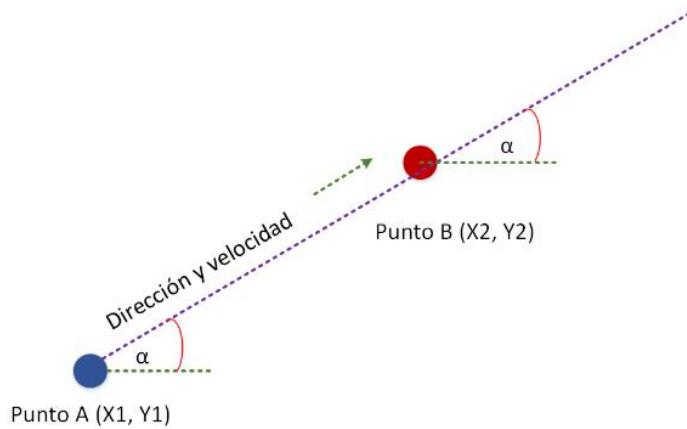


Figura 3.10. Dead Reckoning 2-D
(Varshavsky & Patel, 2009)

En la Figura 3.10 (Varshavsky & Patel, 2009), el ejemplo está basado en coordenadas, donde su primer punto A (X_1, Y_1) es la ubicación inicial, donde se conoce la dirección a recorrer (α), su velocidad v , el tiempo implementado t y la distancia implementada en cierto tiempo (D), que se obtiene a partir de $D = v \times t$. Este arreglo de datos hace posible estimar el punto B (X_2, Y_2), mediante la expresión $X_2 = X_1 + D \cos \alpha$ y $Y_2 = Y_1 + D \sin \alpha$, para cada respectivo punto.

3.5.2.3. Fingerprinting

Es una técnica que utiliza el reconocimiento de patrones, para estimar la posición de un objeto. Fingerprinting está dividida en dos etapas: aprendizaje y en línea. La primera fase es denominada también como fuera de línea, que consiste en almacenar la información de cada punto a localizar en el entorno de estudio, estos puntos cuentan con características primordiales que son necesarias de recolectar (e.g. ángulo, altura, distancia), antes de la activación del sistema. La segunda fase es cuando se hace uso del sistema, que recolecta los parámetros que permite comparar con la información antes guardada. A partir de ello, se determina un conjunto de coordenadas que es cercano al punto especificado (Li, Quader, & Dempster, 2008).

Este método depende de la tecnología que vaya a usarse, un ejemplo es Wi-Fi, donde la precisión de localización está vinculada con la variabilidad de la intensidad de la señal. Esto permite diferenciar los puntos de referencia localizados en un entorno, con la posibilidad de recrear el ambiente de prueba.

3.5.2.4. Triangulación

Triangulación es una técnica que permite determinar la posición de un objetivo a través de las propiedades geométricas de los triángulos, desde diferentes nodos conocidos a lo largo del entorno. Este método se divide en dos partes: lateración y angulación.

Lateración

Es un método denominado cálculo de alcance, que permite medir la distancia entre múltiples puntos de referencia y el objetivo móvil, por medio del tiempo de propagación, intensidad de señal, entre otros. Esta técnica debe contar con al menos tres nodos no colineales que forma un cálculo de 2-dimensiones (ver Figura 3.11), llamado trilateración, así como también el cálculo 3D, que necesita de la medida de cuatro nodos. En otras palabras, el número de nodos de referencia n debe ser uno mayor que el número de dimensiones, si en caso se disminuye el número de nodos a uno su resultado será número infinito de posiciones (Varshavsky & Patel, 2009).

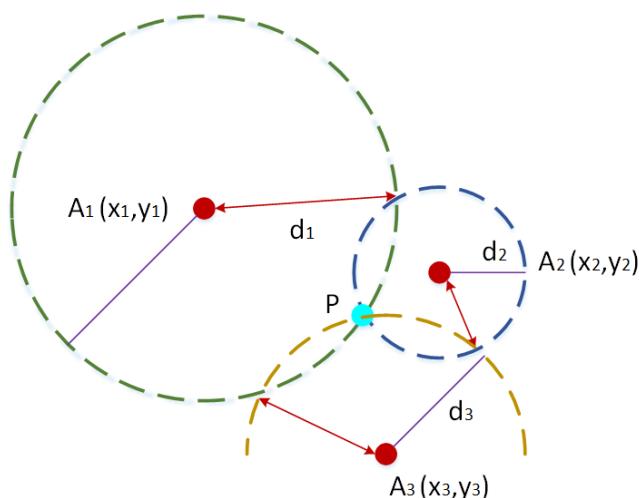


Figura 3.11. Trilateración 2D

Tal como se muestra en la Figura 3.11, los puntos rojos representan los nodos de referencia (A_1, A_2, A_3) con sus respectivas coordenadas (x_i, y_i) , que define el centro del círculo y su radio la distancia (d_i) . Al relacionarlos se estima el objetivo (P). Las técnicas basadas en este método son las siguientes:

- **Tiempo de llegada (Time of Arrival, ToA) / Tiempo de vuelo (Time of Flight, ToF):**
Es un método que se basa en el conocimiento preciso del tiempo de llegada de una señal, enviada desde un nodo emisor hacia diferentes receptores (ver Figura 3.11). ToA

minimiza los efectos multipath que logra una mayor precisión en ambientes internos. Sin embargo, el ruido aditivo es una fuente de error para dicha técnica.

ToA debe contar con una sincronización precisa de tiempo con todos los nodos, esto puede provocar el retardo y así aumentar el coste del sistema. En el caso de dispositivos móviles es necesario transmitir la señal con fecha y hora, posteriormente se calcula la distancia a partir del retardo de tiempo y la velocidad de la señal (Farid, Nordin, & Ismail, 2013).

- **Diferencia de tiempos de llegada (Time Difference of Arrival, TDoA):** Esta técnica es una versión mejorada del ToA, debido a que utiliza dos tipos de señales (radiofrecuencia y acústica) cada una con tiempo y velocidad de propagación diferente, que evita una pérdida de los paquetes y su sincronización. La estimación del TDoA se basa en la diferencia de los tiempos, que se transmite desde los puntos de referencia y nodo objetivo, que logra ubicar la posición en una hipérbola (ver Figura 3.12) (Gezici, 2008).

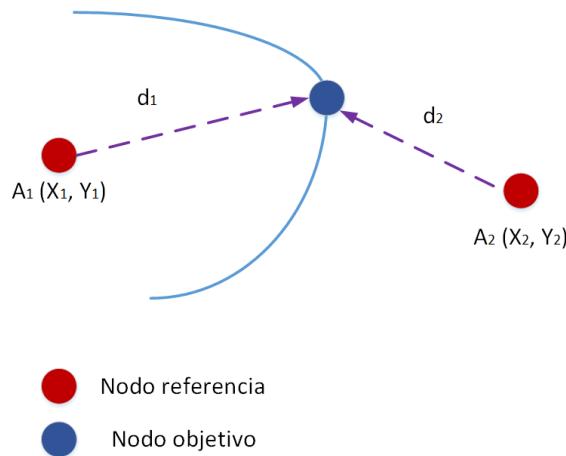


Figura 3.12. Medida TDoA: Hipérbola

Sin embargo, la atenuación que puede sufrir la señal puede ser confundida con ruido o señales provenientes de otro sistema. Otro problema puede verse afectado por los retardos producidos tanto por los nodos emisores como los receptores.

- **Fuerza de la Señal Recibida (RSS):** Es un método que utiliza la potencia del nodo objetivo y es enviada al nodo referencia, este último lo mide y muestra la distancia entre ellos dos (ver Figura 3.11). El parámetro por medir se denomina RSSI en términos de decibelio-milivatio (dBm).

RSS es una técnica que experimentan una pérdida de la señal por el efecto multipath, el sombreado y la pérdida de su trayectoria. Se logra minimizar el desvanecimiento de las

señales, mediante el promedio de la intensidad de la señal en cierto intervalo de tiempo suficientemente amplio (Gezici, 2008).

- **Ida-Vuelta Tiempo de vuelo (Round-Trip Time of Flight, RTToF):** Esta técnica mide el tiempo de ida y vuelta que ocupa la señal desde el emisor al receptor, además cumple con el mismo mecanismo de medición que ToA. Sin embargo, esta técnica no permite conocer el tiempo exacto del retraso, siendo este medido e incluido en la distancia, por lo que se considera la de menor precisión.

Angulación

Es una técnica semejante a la lateración con la diferencia que utiliza ángulos para la localización de un objetivo. Es conocida como dirección de llegada (Direction of Arrival, DoA) o ángulo de llegada (AoA).

Este método de localización es utilizado en el presente proyecto por el particular uso con redes de área local inalámbrica Wi-Fi, que es implementada en arreglo de antenas para una angulación bidimensional. La matriz de antenas implementada en la red de sensores habilita al uso de esta técnica por ser empleada en entornos y separaciones grandes. Estas antenas pueden ser direccionales giratorios que barren un cierto rango, para receptar señales fuertes de dispositivos móviles.

El presente proyecto propone un esquema de localización diferente, la primera parte de este sistema es el uso de la técnica AoA (ver Figura 3.13), que necesita la medida de dos ángulos (α y β), y una distancia entre ellos que puede ser representado por el espacio entre coordenadas de los nodos referencia (A y B), para determinar la posición de un objeto a través de un punto estimado o calculado.

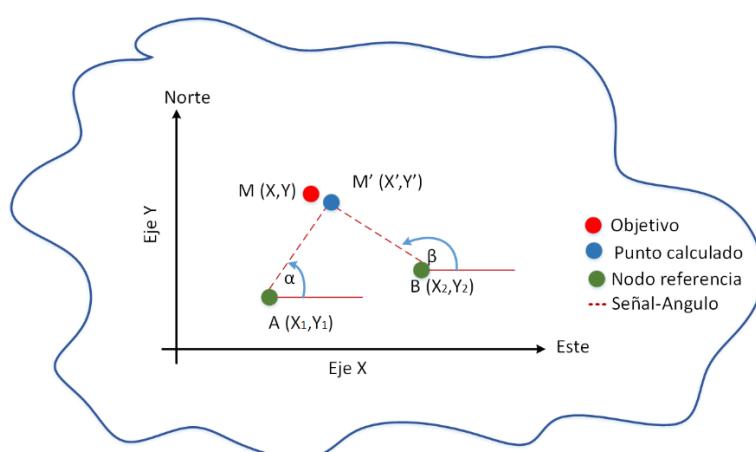


Figura 3.13. Posicionamiento-base AoA en un entorno

La Figura 3.14 muestra el arreglo de antenas, que permiten estimar la RSS en un cierto intervalo angular ($^{\circ}\text{min}$ - $^{\circ}\text{max}$), a través del método AoA. Cada nodo referencia (A, B) debe contar con una ubicación conocida por medio de coordenadas (X_i, Y_i) ($i=1, 2, \dots$). Dichos nodos barren el rango y localizan la intensidad máxima de la señal emitida por el objetivo en un espacio denominado *área de incertidumbre*, esta es medida por ángulos que representa la dirección de propagación α y β .

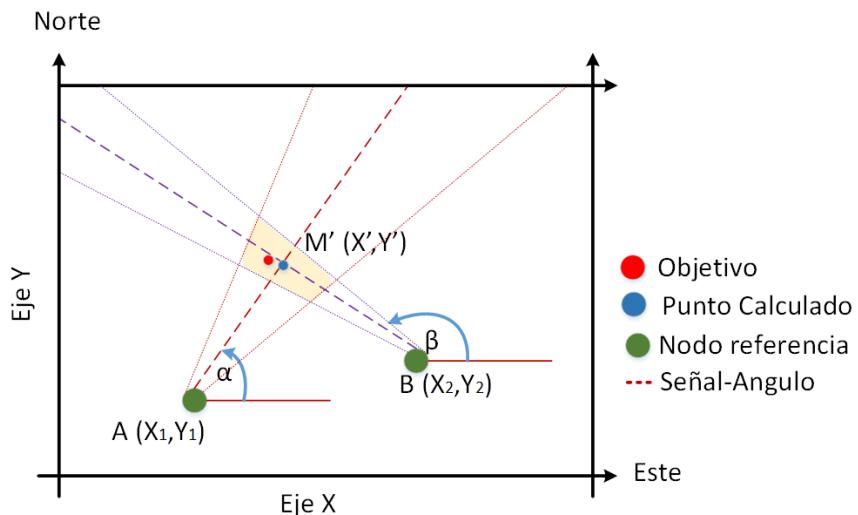


Figura 3.14. Posicionamiento RSS-AoA

Posterior a la medición de los ángulos, es necesario encontrar la recta que simboliza la dirección de propagación máxima. Este cálculo se realiza a cada uno de los puntos o nodos referencia (P_R) en este caso A y B, con el conocimiento previo de sus coordenadas (X_i, Y_i) y sus respectivos ángulos (α y β), además del punto de intersección entre ellos ($M' = (X', Y')$), a través de la ecuación de la recta (Ecuación 3.2 y Ecuación 3.3):

Línea AM'

$$m = \text{Pendiente} = \tan \alpha = \frac{Y' - Y_1}{X' - X_1}$$

$$\tan \alpha (X' - X_1) = Y' - Y_1$$

Ecuación 3.2. Ecuación de la recta AM'

Donde

$$X' \tan \alpha - X_1 \tan \alpha = Y' - Y_1$$

$$X' \tan \alpha - X_1 \tan \alpha = Y' - Y_1$$

Luego se obtiene las ecuaciones (1) y (2), que representan X' y Y' :

$$Y' = X' \tan \alpha - X_1 \tan \alpha + Y_1 \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$X' = \frac{Y' - Y_1 - X_1 \tan \alpha}{\tan \alpha} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Línea BM'

$$m = \text{Pendiente} = \tan \beta = \frac{Y' - Y_2}{X' - X_2}$$

$$\tan \beta (X' - X_2) = Y' - Y_2$$

Ecuación 3.3. Ecuación de la recta BM'

Donde

$$X' \tan \beta - X_2 \tan \beta = Y' - Y_2$$

$$X' \tan \beta - X_2 \tan \beta = Y' - Y_2$$

Luego se obtiene las ecuaciones (3) y (4), que representan X' y Y' :

$$Y' = X' \tan \beta - X_2 \tan \beta + Y_2 \quad \text{Ecuación (3)}$$

$$X' = \frac{Y' - Y_2 - X_2 \tan \beta}{\tan \beta} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Ya con las ecuaciones antes obtenidas se despejan para tener X' y Y' . Para X' se utiliza las ecuaciones (1) y (3), que da como resultado la ecuación (5).

$$X' = \frac{X_1 \tan \alpha - X_2 \tan \beta + Y_2 - Y_1}{\tan \alpha - \tan \beta} \quad \text{Ecuación (5)}$$

De manera similar se emplea las ecuaciones (2) y (4), que dan como resultado Y' en la ecuación (6).

$$Y' = \frac{(X_1 - X_2) \tan \alpha \tan \beta - Y_1 \tan \beta + Y_2 \tan \alpha}{\tan \alpha - \tan \beta} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Las ecuaciones (5) y (6), permiten la localización del nodo M' (X' , Y'), como se observa en la Ecuación 3.4:

$$M' = \left(\frac{X_1 \tan \alpha - X_2 \tan \beta + Y_2 - Y_1}{\tan \alpha - \tan \beta}, \frac{(X_1 - X_2) \tan \alpha \tan \beta - Y_1 \tan \beta + Y_2 \tan \alpha}{\tan \alpha - \tan \beta} \right)$$

Ecuación 3.4. Coordenadas Punto de Intersección-AoA

La ventaja de usar AoA es la estimación de posición, ya que no cuentan con la necesidad de usar un gran número de dispositivos tanto para la medición en 3D como la 2D, además de no necesitar una sincronización del tiempo. Sin embargo, se conoce que para el uso de esta técnica es necesario hardware relativamente grande y complejo(Liu, Banerjee, & Liu, 2007). En los siguientes capítulos se describe una solución optimizada hardware para el uso de la técnica AoA.

3.5.3.Sistemas de Localización

Los sistemas de localización han sido desarrollados para la estimación de posicionamiento tanto en ambientes internos como externos, a través de diferentes tecnologías. Hoy en día la creación de sistemas e infraestructuras de red dedicadas a la localización, se identifican con aplicaciones inalámbricas debido a la precisión y calidad de detección de objetos. Además de la modularidad tanto en hardware como en software que disminuye su coste y tamaño, al mismo tiempo aumenta procesamiento y robustez.

El presente proyecto se enfoca en los sistemas basados en radio frecuencia, en especial en redes de área local inalámbrica (WLAN), que utiliza ondas electromagnéticas para enviar información en entornos de gran espacio. La principal ventaja de esta tecnología es la asequible modularidad de técnicas, métodos y hardware. WLAN se basa en el estándar IEEE 802.11b/g, conocido en el mercado como Wi-Fi, sin embargo, este término es la marca del hardware que dispone de este estándar.

3.5.3.1.Protocolo IEEE 802.11b/g/n - Wi-Fi

La presente sección muestra los fundamentos y características de Wi-Fi, y la razón de uso en el presente proyecto.

IEEE 802.11 es un estándar que define y especifica las características del WLAN. Wi-Fi es conocido también como Wireless Fidelity, esta tecnología ha evolucionado constantemente en los últimos años y con ello su uso ha incrementado de forma progresiva en entornos internos y externos. WLAN está constituido por cuatro partes: (i) Estación, dispositivos ubicuos con interfaces de redes inalámbricas (ii) punto de acceso, dispositivo puente que permite la

comunicación entre la estación y red fija, (iii) sistema de distribución, mayor área de cobertura y (iv) medio inalámbrico (ver Figura 3.15) (Andrade, Salas, & Paredes, 2008).

Wi-Fi tiene la capacidad de formar redes inalámbricas de área local (Local Área Network, LAN) con un alto rendimiento de alcance y velocidad, siempre y cuando el punto de acceso se

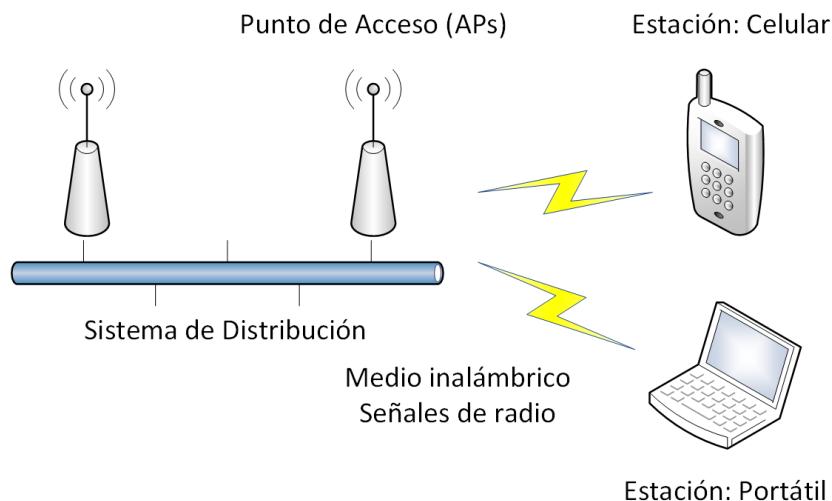


Figura 3.15. Arquitectura Wi-Fi

encuentre lo más cercano a su línea de vista o rango. En los últimos años la mayoría de dispositivos ubicuos cuentan con esta tecnología por el hecho de no contar con una conexión cableada. Existen diversos tipos de Wi-Fi, a continuación, se describe los estándares de uso mayor en el mercado (Ibrahim & Ibrahim, 2010) (ver Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Características-Estándar IEEE 802.11

ESTANDARES IEEE 802.11			
Estándar IEEE	802.11b	802.11g	802.11n
Año Adoptado	1999	2003	2009
Banda de Frecuencia	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4/5 GHz
Velocidad Media de bits	5 Mbit/s	22 Mbit/s	300 Mbit/s
Velocidad Max. de bits	11 Mbit/s	54 Mbit/s	600 Mbit/s
Alcance Ambiente Interno	45 m	45 m	91 m
Alcance Ambiente Externo	90m	130 m	182 m

Las estimaciones del alcance varían según los ambientes y las condiciones de empleo, por esta razón la técnica Wi-Fi ha sido considerada de mayor uso en el ámbito mercantil. Actualmente los sistemas de localización fijan su objetivo en ambientes internos tales como universidades,

hospitales, zonas urbanas; sin embargo, en ambientes externos usualmente es usado la técnica GPS, con la diferencia que Wi-Fi brinda una localización más exacta.

Wi-Fi brinda a este proyecto la oportunidad de recibir y enviar datos de forma inalámbrica, usado como tecnología de localización de objetos ubicuos, donde un punto de acceso puede receptar o emitir ondas que son medidos de acuerdo con su potencia y enviados a una estación base, para su respectivo cálculo de estimación. Esta tecnología refleja un coste-efecto a favor tanto por el software y hardware que puede ser encontrado en el entorno o utilizado de forma adicional.

3.6. Sistema de Localización Interno y Externo

El presente proyecto se denomina “Sistema de localización interna y externa, para el posicionamiento de un mini vehículo autónomo”, tiene como fin determinar una posición en ambientes internos y externos. El posicionamiento en un entorno externo viene ligado con el uso de navegación por satélite GPS, que ha dado inicio a un número amplio de aplicaciones que muestran una estimación cercana al punto origen, y de la misma manera se maneja en espacios internos donde la señal GPS no llega. Sin embargo, este proyecto busca la localización exacta de un objeto en estado dinámico y estático por medio de la tecnología Wi-Fi. Como ya se conoce Wi-Fi se encuentra presenta en un sin número de dispositivos que pueden ser partícipes de ese sistema debido a su coste, tamaño, procesamiento, vida útil y su capacidad de modularidad con el software.

Esta sección define los dispositivos utilizados para la construcción del nodo sensor que forma parte de la red de sensores inalámbricos (CAPITULO 4). A continuación, se describe los módulos ESP8266, antena Yagi y servomotores.

3.6.1.Módulos ESP-8266

El módulo Wi-Fi ESP8266 es un dispositivo que permite la conexión de un objeto al Internet, denominado IoT. Existen diferentes versiones con distintas configuraciones para las aplicaciones. Cada uno de ellos cuenta con diferentes variaciones como: costo, tamaño, número de pines GPIOs (General Purpose Input/ Output), memoria, entre otras (Jalamkar & Selvakumar, 2016).

Este tipo de módulo fue seleccionado para la implementación de este proyecto por la capacidad de recibir y enviar datos de forma inalámbrica, además de poder detectar la intensidad de la

señal emitida por otro dispositivo, se identifica a esto que el módulo actúa de forma independiente por contener un microprocesador. Para su correspondiente programación se usa el IDE (Integrated Drive Electronics) Arduino (Patel, Patoliya, & Patel, 2015). A continuación, se describe dos de los módulos utilizados en el proyecto.

Módulo ESP8266-12E

El módulo ESP8266-12E es utilizado en el proyecto para detectar la señal transmitida por el drone, esta versión de módulo viene dado por diferentes presentaciones la utilizada en el prototipo es aquella que lleva su batería de forma portátil, incluso cuenta con varios pines GPIOs (Figura 3.16). Esto permite controlar el movimiento de los servomotores y enviar datos al próximo módulo ESP8266-01 a través de una conexión serie.

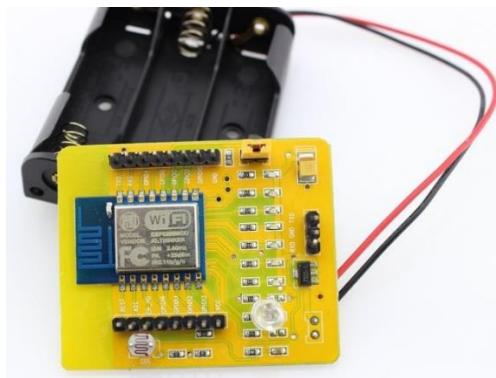


Figura 3.16. Módulo ESP8266-12E
(RLXComponents, 2017)

Módulo ESP8266-01

El módulo ESP8266-01 es utilizado por ser la versión más pequeña y barata en el mercado. Se implementa para él envío de datos al ordenador de forma inalámbrica (ver Figura 3.17). La característica de mayor relevancia es su alimentación de 3.3V, por esta razón el prototipo cuenta con una protección de voltaje que es presentado en el CAPITULO 4.

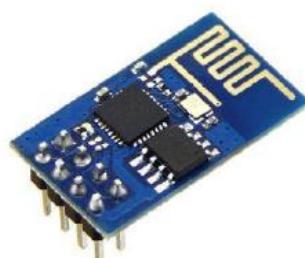


Figura 3.17. Módulo ESP8266-01
(Jalamkar & Selvakumar, 2016)

La razón por la que es utilizado dos antenas es porque permiten la comunicación inalámbrica simultánea, uno hacia el drone y otro al enrutador, sin provocar la pérdida de eficiencia.

3.6.2. Antena Yagi

Una antena Yagi es una antena direccional, formada por elementos activo (dipolo) y pasivo, usada en la recepción de televisión. Esta antena cuenta con un ancho de banda estrecho, y siempre y cuando se desee variar su banda existe la opción de variar la longitud de los directores (Scribd, 2011). Se la conoce por contar con un dipolo accionado, un reflector dipolo parásito y una o varios directores dipolos parásitos, en otras palabras, la estructura general cuenta con dipolos ubicados en el mismo plano unidos al mástil, está configuración da señales de radiofrecuencia un impulso direccional (Kaneda, Deal, Qian, Wterhouse, & Itoh, 2002).

La antena Yagi es parte del prototipo nodo sensor del presente proyecto de sistema de localización, a esto se le suma una antena receptora que giran en un punto fijo y barren cierto rango. Posteriormente identifica la intensidad máxima de la señal Wi-Fi, que da lugar a la dirección de fuente a través de un ángulo. A continuación, en la Figura 3.18 se muestra el modelo utilizado en el proyecto, impreso en 3D (Photonix, 2012).

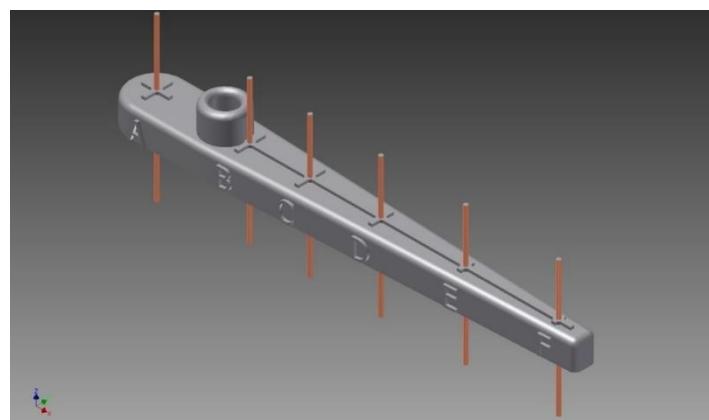


Figura 3.18. Antena Yagi
(Photonix, 2012)

3.6.3. Micro Servo SG90

Los servomotores son un tipo de motores que permite controlar su rotación con precisión, existe dos tipos de motores: (i) corriente continua (Direct Current, DC), y (ii) corriente alterna (Alternate Current, AC) (Krishnan, 1987). La primera es utilizada en aplicaciones de corto alcance, en cambio el segundo es usado en aplicaciones industriales. No obstante, para el control de los servos se realiza a través de servomecanismo, que se define a la emisión de una señal para que el motor gire hasta que alcance el ángulo dado.

En este proyecto se utiliza un servomotor denominado Micro Servo SG90 de pequeñas dimensiones, ligero, costo económico y rendimiento, con capacidad de girar de 0° a 180°. Estos servomotores son utilizados, para girar la antena Yagi e incluido el módulo ESP-8266XX de manera que puede barrer un área y detectar automáticamente la máxima señal Wi-Fi desde diferentes ángulos (ver Figura 3.19) (Micropik, 2016).



Figura 3.19. Micro Servo SG90
(Micropik, 2016)

Por ser considerado óptimo para este proyecto a continuación se describe en la Tabla 3.4 las características principales de rendimiento (Micropik, 2016).

(Micropik, 2016)
Tabla 3.4. Especificaciones SG90 Servo Motor

Características	
Peso	9g
Dimensiones	22.2 x 11.8 x 31 mm
Esfuerzo de torsión	1.8 Kgf.cm
Ancho de Banda muerta	10 µs
Velocidad de Operación	0.1 s/60°
Voltaje de Operación	4.8V (~5V)
Rango de temperatura	0 °C- 55°C

3.7. Movilidad del UAV

Esta sección se define al vehículo aéreo no tripulado, ya que el proyecto usa al drone como objetivo a posicionar, por esta razón se describe el dispositivo utilizado en el presente proyecto y la herramienta empleada para controlar la aplicación del drone.

3.7.1. Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV)

El vehículo aéreo no tripulado es tecnología emergente usado como vigilancia aérea, o también como advertencia ante desastres naturales por la capacidad de ingresar a lugares inaccesibles. En otras palabras, es la solución adecuada para proteger al ser humano ante todo peligro. Los UAVs se encuentran en el mercado por existir de diferente tamaño y coste, sin embargo, cabe recalcar que en estos últimos años los avances tecnológicos han dado lugar a una economía en progreso (Gupta, Jain, & Vaszkun, 2016).

3.7.2. Drone Cheerson CX-10W

CX-10W corresponde a la tercera generación de la serie mini quadcopter Cheerson, que es controlada de forma remota mediante una aplicación móvil. Cuenta con una cámara de 0.3 MP (Mega Pixeles) con una resolución de 720 * 576 pixeles, hábil de enviar una secuencia de video a la aplicación. Por tanto, tiene la capacidad de tomar fotografías y videos (ver Figura 3.20) (Flyer, 2016). Las imágenes capturadas son usadas para el modelo 3D que es utilizado en el sistema de fotogrametría del presente proyecto. Por tanto, este drone es el objeto a ser controlado por medio del sistema de localización.



Figura 3.20. Drone CX-10W
(Drone Flyers, 2017)

A continuación, en la Tabla 3.5 muestra las características principales del Drone CX-10W, que deben ser tomadas en cuenta para la implementación del sistema de localización y vuelo.

(Drone Flyers, 2017)
Tabla 3.5. Especificaciones del Drone CX-10W

Características	
Frecuencia	2.4 GHz
Canal	4 Canal

Giroscopio	6 Ejes
Dimensiones	62x62x20mm
Peso	15g
Máx. Control de Dist.	30m
Tiempo de Vuelo	4-5 minutos
Tiempo de carga	30 minutos
Batería	3.7 V 150mAh
Cámara	0.3MP

3.8. Sistema de Fotogrametría

El sistema de fotogrametría en este proyecto se define a la última sección del proyecto, donde el usuario es encargado de seleccionar las imágenes tomadas por el drone de forma automática. Estas imágenes son enviadas al servidor de Autodesk Remake, que permite formar estas imágenes a un modelo 3D tanto del espacio como del objeto sobrevolado.

3.8.1. Fotogrametría

Fotogrametría es el método de medición que permite la reconstrucción de la posición e interpretación de imágenes a través de la forma, el tamaño de objetos y su ubicación a partir de una o varias fotografías del objeto o del entorno (Luhmann, Robson, Kyle, & Boehm, 2014). Este estudio está relacionado con el área de las matemáticas ya que relaciona a la imagen y el espacio de objetos, para ser grabado fotográficamente, el objetivo es la reconstrucción 3D de un objeto en forma digital. Las fotografías son aquellas que guardan información indispensable para la fotogrametría, existen tres tipos de imágenes: (i) fotoquímicas (convencional), (ii) fotoeléctricas (digital), y (iii) escáner laser. Existen diferentes resultados en el análisis fotogramétrico (Kraus, 2007), como:

- Coordenadas de puntos separados en un sistema tridimensional.
- Dibujos de plano o planos con detalle planimétrico con líneas de contorno.
- Modelo geométrico.
- Imágenes derivadas o rectificadas que dan lugar a los fotomapas, fotomontajes o fotodelos tridimensionales.

La principal aplicación de la fotogrametría es la elaboración de mapas topográficos en forma de mapas lineales, para este cometido se utiliza instrumentos fotogramétricos como los

digitalizadores 3D ayudadas por un ordenador (Kraus, 2007). A continuación, se define la aplicación utilizada para la fotogrametría que da lugar a un fotomodelo tridimensional.

3.8.2. AutoDESK Remake

Es un programa que permite crear un modelo 3D de alta definición, a través de fotografías (Loughner & Oldham, 2017). De esta manera las fotografías que son tomadas por el UAV sobrevolando el objeto deseado, se envía a un software denominado AutoDESK Remake que se especializa en esta tarea (Autodesk, 2015). A continuación, en la Figura 3.21 muestra un ejemplo del modelo 3D generado por el actual programa.



Figura 3.21. Modelo 3D-AutoDESK Remake
(Autodesk, 2015)

Anteriormente se define la acción del sistema de fotogrametría del proyecto, donde es necesario generar un modelo a través de una selección de imágenes que son enviadas a la nube donde se realiza el procesamiento de fotomodelo. Al término de este proceso se devuelve al usuario el objeto en 3D.

3.9. Síntesis

Los conceptos mencionados permiten que el proyecto siga su curso mediante la metodología DSR, que define en un principio las directrices que toma este trabajo científico. Por tanto, en el presente capítulo se define el origen, la base y conceptos del sistema elegido que viene desde las ondas electromagnéticas que viajan sin un medio de comunicación, emitida por un emisor y recibidas por un receptor que forman parte de los denominados nodos sensores que se encuentran en las redes de sensores inalámbricos, a esto se le suma una estación base y Gateway.

También se toma en cuenta la configuración de localización que es fundamental, para la programación correspondiente a la aplicación de control, no obstante, se detalla las diferentes

técnicas y algoritmos de localización, que al final se describe el método implementado de forma básica. De acuerdo al análisis realizado en el CAPITULO 2 de los diferentes sistemas de localización este proyecto se enfoca en la tecnología de radio frecuencia en redes de área local inalámbrica que se basa en el estándar 802.11b/g, que da lugar a la implementación de esta tecnología en el presente trabajo por contar con características primordiales como: bajo en costo, alto rendimiento de alcance y velocidad, y estar presente en diferentes dispositivos ubicuos un ejemplo es el vehículo aéreo que se encuentra como objetivo de búsqueda.

Al conocer las herramientas tanto software como hardware que deben estar presentes en este sistema de localización se logra definir cada una de las herramientas que son implementadas en el presente proyecto. En el siguiente capítulo se aborda el diseño e implementación del sistema de localización como propuesta de solución.

4. Diseño e Implementación del Sistema

Este capítulo forma parte de la fase Investigación Ciencia del Diseño, de la metodología DS que presenta la especificación de requisitos tanto del sistema de localización como la automatización del drone, para el diseño de ambos sistemas de forma optimizada. No obstante, se muestra el desarrollo e implementación del sistema, las herramientas usadas y pruebas implementadas, que garantizan la calidad del prototipo.

4.1. Diseño

La localización de objetos de forma estática y dinámica puede presentar un mayor grado de error de posicionamiento en ambientes poco comunes. Sin embargo, la permanente necesidad de conocer la posición tanto de objetos y del personal, esto ha llevado al desarrollo e implementación de un sistema por medio de técnicas y métodos ya conocidos. El objetivo de este sistema de localización Wi-Fi es el uso de módulos o sensores, con ciertas particularidades, como; tamaño, costo, vida útil y procesamiento; además de usar ciertos métodos y técnicas que permiten la recepción, procesamiento y envío de datos al nodo central en tiempo real. Para lograr este cometido el presente trabajo se divide en dos partes, la primera proyecta la modularidad tanto del software como del hardware, que encamina a: (1) Construcción de un nodo sensor con módulos y receptores Wi-Fi; y (2) Implementación de técnicas y métodos, que aseguren la localización de un objeto en estado estático y dinámico en entornos externos e internos. La segunda parte del proyecto es el posicionamiento de un objeto específico, en este caso un mini UAV, que acorde con los objetivos del proyecto este dispositivo realiza: (3) Vuelo autónomo 2D, a través de una ruta establecida; y (4) Obtener fotografías de la ruta u objeto sobrevolado.

Uno de los aspectos a considerar en la primera parte de este proyecto es el método y la tecnología de localización, que acorde al objetivo de un sistema de posicionamiento es: (i) disminución del error de posicionamiento; (ii) estimación de localización de un dispositivo autónomo. Sumado a esto es la movilidad de un vehículo que no cuenta con herramientas de

desarrollo de software. Estos desafíos son punto clave para el diseño e implementación de un sistema de localización interno y externo de un dispositivo autónomo.

4.1.1. Especificación del Alcance y Análisis de Requisitos

4.1.1.1. Alcance

Este primer apartado es referente al *Ciclo de Relevancia* donde este proyecto cuenta con dos partes: (i) sistema de localización y (ii) sistema UAV, de acuerdo con el análisis realizado en el capítulo 3, el sistema de localización posiciona un objeto en estado dinámico y estático. El objeto para localizar es un mini drone, que forma parte de un sistema de movimiento autónomo. A continuación, se propone una solución genérica a cada uno de los sistemas.

Sistema UAV

- La estación base debe mantener una comunicación con el drone. Este envía las coordenadas que el vehículo debe tomar en movimientos 2D, para cumplir con la ruta establecida por el usuario.
- Mantener la comunicación entre la estación base, dispositivo celular y drone, para la visualización de la ruta a través de la cámara presente del vehículo.
- Comunicación y envío de comandos entre la estación base y el dispositivo celular, para la toma automática de fotografías.

Esta solución cuenta con la creación de una aplicación Android y una aplicación que forma parte del proyecto principal. El primero permite interaccionar con la aplicación principal de drone e injectar el código que controla la movilidad del UAV. Por otro lado, la segunda fase permite enviar las coordenadas que el drone debe recorrer, además de obtener fotografías de forma automática.

Sistema de Localización

- Implementación de módulos emisores y receptores Wi-Fi, para la recolección de potencia máxima emitida por el drone en tiempo real.
- Implementación de la técnica de localización AoA, para la optimización del posicionamiento, mediante la disminución del error.

Este sistema forma parte del proyecto principal que está conformado por software y hardware. A software se refiere la interfaz gráfica del proyecto donde el usuario simula un escenario igual

al real, además del procesamiento de los datos emitidos por el drone que permiten estimar una posición. Hardware se refiera a la construcción de un prototipo diferente, que cuenta con dispositivos Wi-Fi, antena y batería móvil.

4.1.1.2. Requisitos

Este proyecto cuenta con dos tipos de sistemas cada uno debe cumplir con diferentes funciones, que define características que son indispensables para lograr su finalidad. Estos requisitos se dividen en tres: Funcionales, no Funcionales y de Rendimiento. En las siguientes secciones se define los requisitos que son parte fundamental para el desarrollo de este proyecto dividido en sistema UAV y sistema de localización.

Requisitos Funcionales

A continuación, en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2 se define los requisitos funcionales respectivamente del Sistema UAV y localización.

- Sistema UAV**

Tabla 4.1. Requisitos funcionales del Sistema UAV

Nº	Requerimiento	Funcionalidad	Prioridad
1	Vuelo drone	Vuelo del drone en dos dimensiones.	Alta
2	Imagen	Tomar una fotografía de la ruta o de un objeto sobrevolado de forma instantánea, en cada uno de los waypoints.	Media
3	Vuelo establecido	Seguir la ruta establecida por el usuario, donde el drone cumple su vuelo de forma ordenada.	Alta
4	Vuelo drone	Velocidad controlada en todo el vuelo del drone.	Alta
5	Vuelo drone	Rotación del drone.	Media
6	Ubicación del drone	Ubicación del drone de forma frontal apuntando al Norte.	Alta

- Sistema de Localización**

Tabla 4.2. Requisitos funcionales del Sistema de Localización

Nº	Requerimiento	Funcionalidad	Prioridad
1	Nodo sensor	Capacidad de percepción de los nodos sensores.	Alta

2	Procesamiento de información	Procesamiento de la información, para el cálculo de coordenadas estimadas.	Alta
3	Nodo sensor	Detectar la potencia máxima emitida del drone.	Alta
4	Ruta estimada	Muestra de la ruta estimada por medio de la Interfaz gráfica.	Alta
5	Nodo sensor	Movimiento horizontal de la antena.	Alta

Requisitos No Funcionales

A continuación, en la Tabla 4.3 y Tabla 4.4 se define los requisitos funcionales respectivamente del Sistema UAV y localización.

- **Sistema UAV**

Tabla 4.3. Requisitos No Funcionales del Sistema UAV

Nº	Requerimiento	Funcionalidad
1	Vuelo	Vuelo del drone en el plano X, Y y Z.
2	Rotación	Rotación del drone con dirección de vista al objeto.
3	Vuelo	Tiempo de respuesta para el vuelo del drone.
4	Imagen	La capacidad de tomar una gran cantidad de fotografías.

- **Sistema de Localización**

Tabla 4.4. Requisitos No Funcionales del Sistema de Localización

Nº	Requerimiento	Funcionalidad
1	Nodo sensor/ Interfaz gráfica	El uso de tres o más sensores.
2	Nodo sensor	La batería debe ser portátil (larga duración y recargable).
3	Nodo sensor	Tiempo de detección de potencia de los tres sensores.
4	Nodo sensor	Tiempo de detección del drone, para el inicio de su movilización.
5	Nodo sensor	Movilización horizontal y vertical de la antena.
6	Interfaz gráfica	Número infinito de waypoints para trazar la ruta.

Requisitos de Rendimiento

A continuación, en la Tabla 4.5 y Tabla 4.6 se define los requisitos funcionales respectivamente del Sistema UAV y localización.

- **Sistema UAV**

Tabla 4.5. Requisitos de Rendimiento del Sistema UAV

Nº	Descripción
1	Para la programación de la aplicación Android que interactúa con la aplicación del drone, se utiliza el programa IntelliJ IDEA versión 2016.2.4
2	Es necesario que el dispositivo celular tenga acceso root, que permite al usuario tener control sobre el dispositivo.
3	La aplicación usada para el control del drone por vía Wi-Fi del dispositivo celular Android.
4	Para la programación del manejo autónomo del drone, se utiliza el programa Netbeans versión 8.2. Ninguna de las versiones cuenta con problemas para el uso de este sistema.

- **Sistema de Localización**

Tabla 4.6. Requisitos de Rendimiento del Sistema de Localización

Nº	Descripción
1	Para la programación de los módulos se utiliza el programa Arduino versión 1.6.12. Ninguna de las versiones anteriores cuenta con problemas.
2	En la programación de la interfaz gráfica se utiliza el programa Netbeans versión 8.2. No existe ningún problema con versiones antes o posteriores a la definida.
3	Librería JxBrowser para la muestra de páginas web en aplicaciones Java.
4	Circuito de protección en cada uno de los módulos.

4.2. Diseño Conceptual

Este segundo apartado es referente al *Ciclo de Rigor*, donde se proyecta la arquitectura general de este proyecto, que sustenta la creación de un artefacto y sistema diferente, mediante distintos métodos y herramientas de construcción.

4.2.1. Arquitectura del Sistema

De acuerdo con el objetivo del sistema pretende estimar la posición 2D de un objetivo, en este caso un mini vehículo aéreo, que se maneja de forma autónoma bidimensional, mediante técnicas, métodos y diferentes dispositivos de localización. Existe varias consideraciones de diseño, entre ellas los módulos a utilizar deben contar con una óptima funcionalidad, para que lleguen a ser parte de la red de sensores inalámbricos. Además de ser componentes electrónicos

de gran procesamiento, se caracterizan por ser de bajo costo y bajo consumo de batería, que forman una solución genérica para la implementación del sistema.

Por otra parte, el objetivo a ser localizado es un dispositivo que se caracteriza por su tamaño, costo y la facilidad de ingresar a lugares de difícil acceso, que son mostradas a través de video y fotografías al usuario. Este dispositivo se convierte en la fuente emisora de ondas, que son interpretadas por la intensidad de la señal. Señalado las herramientas indispensables en cada sistema, se debe tener en cuenta que la integración que existe entre ellas es por medio de la tecnología Wi-Fi, que se considera de mayor uso en dispositivos ubicuos, por tanto, se califica que el proyecto cuenta con una solución correcta.

En la siguiente Figura 4.1 se observa el sistema de localización en ambientes internos y externo, mediante el uso de módulos Wi-Fi, para la localización de un mini vehículo aéreo autónomo, donde el UAV es el punto central emisor de ondas, que sigue una ruta trazada de forma 2D por el usuario y es necesario que sea localizado. A su alrededor se encuentra establecido tres nodos sensores que forman un esquema centralizado, sin embargo, para su respectivo posicionamiento es necesario que sean ubicados de forma absoluta y simbólicamente. En primer lugar, es necesario que el usuario trace un plano cartesiano que sirve de referencia simbólica para la ubicación de los nodos, donde a través de una localización absoluta se traza el eje Y, este a punta al norte geográfico, mientras que el eje X muestra el Oeste. Esta localización permite especificar un punto de inicio en el plano cartesiano, que admite tomar medidas para la localización de los nodos. En este caso es necesario puntualizar, que mientras mayor sea el número de sensores, mejor será la estimación de localización, es decir mejora su precisión y disminuye el error de distancia; sin embargo, mientras se incrementa el número de prototipos (recursos) el coste incrementa proporcionalmente.

Puestos en posición cada uno de los nodos sensores es necesario ubicar una computadora central con conexión a Internet, además de un router y un dispositivo móvil. En primera instancia el proceso de todo el sistema es gestionado a través del computador central, en él se encuentra presente una interfaz gráfica, que muestra un mapa con la localización general del cliente. En este mapa se define tanto la ruta que el drone debe sobrevolar a manera de waypoints, como también las antenas a usar en el espacio real, cada uno de ellos necesita de ciertas características impuestas por el cliente que deben satisfacer a las del tiempo real.

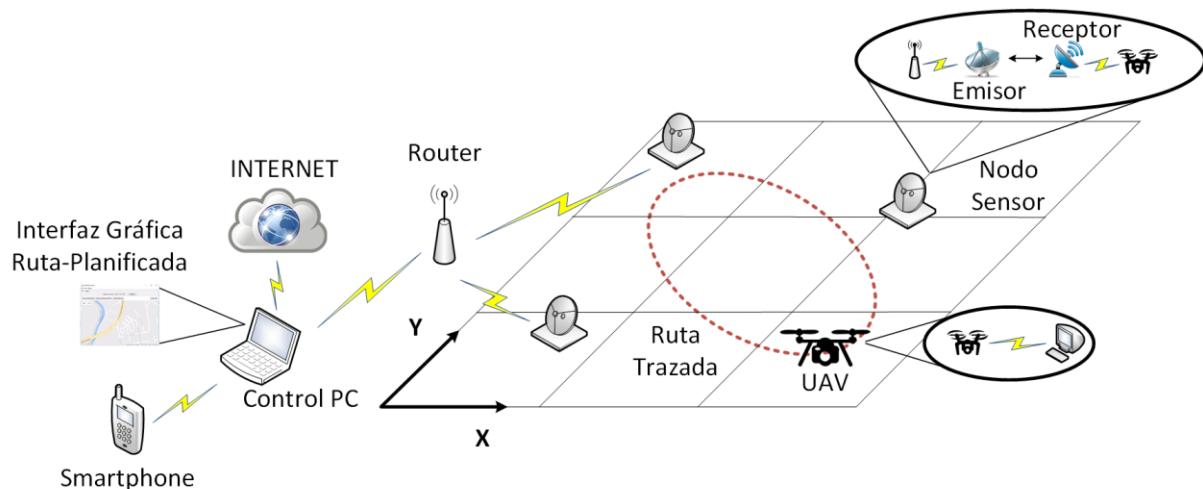


Figura 4.1. Arquitectura general del Sistema de Localización

El computador central se encuentra conectado a un router, que forma una red privada al cual están conectados todos los nodos sensores. Esto permite que el computador acceda a los nodos a través de un único punto de comunicación, que da lugar al envío y recepción de datos necesarios, para que el proceso de comienzo y posteriormente reciba la información transmitida por los nodos. Cada nodo sensor está conformado por dos módulos Wi-Fi, el uno actúa como receptor y el otro como emisor, que forman un módulo receptor y emisor de señales, donde cada uno contiene un procesador que funciona de forma autónoma. A esto se le suma una pequeña antena direccional Yagi, que genera una mayor amplitud de la onda que percibe la potencia emitida por el objetivo “drone”. El objetivo de este prototipo es la recolección y actualización de datos en tiempo real de forma instantánea, donde el módulo receptor se conecta directamente al UAV por medios inalámbricos, este lee la potencia de la señal Wi-Fi emitida por el drone, denominada RSS. Posteriormente la antena receptora se encuentra conectada de forma serial a la antena emisora, para enviar los datos recibidos, este último es el responsable de que emitir esa misma información al nodo central, que corresponde al computador (ver Figura 4.2).

El dispositivo a posicionar, forma parte del módulo de vuelo, donde el drone se encuentra conectado al computador por medios inalámbricos. El computador envía la señal para que los nodos empiecen a funcionar, posteriormente el proceso de localización se pone en acción y es reconocido por los nodos la potencia del drone. Con base a esta información, nuevos comandos son calculados y enviados directamente al UAV con el objetivo de manejarlo por la ruta definida, durante este proceso el vehículo captura un video que es transmitido a través del dis-

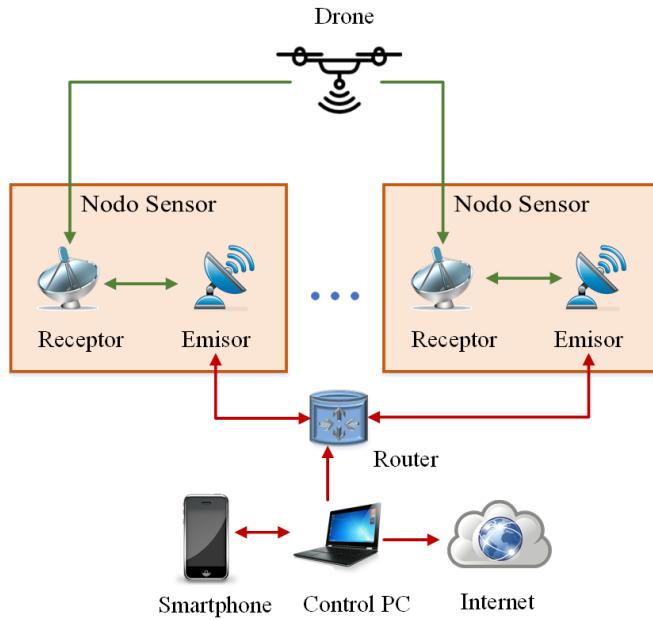


Figura 4.2. Arquitectura específica del sistema de localización

positivo móvil. A esto se le añade la capacidad de tomar fotografías de forma automática en cada uno de los waypoints y enviarlas al computador mediante una conexión USB (Universal Serial Bus) (ver Figura 4.3). El usuario en esta etapa tiene la opción de subir al servidor Remake del programa Autodesk, para la formación de un modelo 3D.

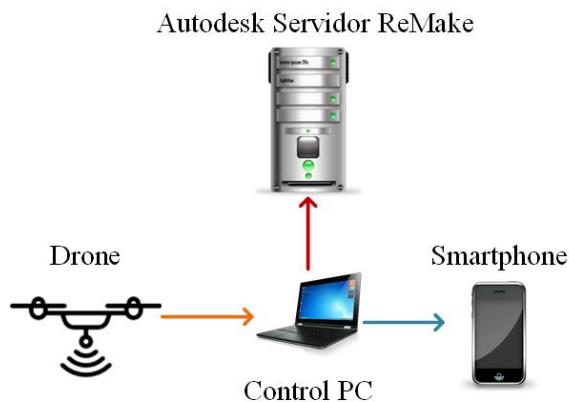


Figura 4.3. Arquitectura específica del sistema UAV

Continuando con el diseño uno de los aspectos importantes del sistema de localización es el *módulo de posicionamiento*. Al poner en marcha todo el sistema los nodos empiezan a rotar en un rango establecido, estos captan la potencia máxima del drone, que es procesada en el Computador central por medio del método de posicionamiento: *Ángulo de llegada*, seleccionado por el hecho de utilizar potencia medida a través de ángulos, estos son enviados al computador para su respectiva búsqueda de estimación. Para la evaluación de desempeño de la técnica anterior se usa el *Error estimado*. Este último es denominado como Distancia

Euclíadiana entre la posición en entorno real y la posición estimada por la técnica de localización (ver Ecuación 3.5).

$$E = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2}$$

Ecuación 3.5. Distancia Euclíadiana

Donde (X_1, Y_1) corresponde a las coordenadas de la ubicación en tiempo real, y los datos calculados (X_2, Y_2) . Si su resultado da valores elevados puede ser provocados por diferentes razones como el espacio, el viento, obstáculos de vista e incluso error en su referencia, por este motivo las pruebas serán realizadas en espacios que permitan tener variabilidad del RSS.

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo 1 la optimización de estimación de localización se determina a través de 5 factores:

- **Espacio:** Se instala el sistema en un ambiente interno y externo, con un espacio de 5*5 y 10*10;
- **Sistema de referencia espacial:** Como se señaló anteriormente, se traza un plano cartesiano de acuerdo con las coordenadas geográficas;
- **Métodos de medición que permite el uso de diferentes parámetros:** El parámetro a medir por un método de posicionamiento es la potencia de la señal, queda lugar al ángulo de llegada;
- **Método de posicionamiento:** AoA, permite el cálculo de posicionamiento;
- **Protocolos para el proceso de localización:** Protocolo de comunicación definido en la sección *módulo envío y recepción de datos*.

De acuerdo con estos factores la solución expuesta cumple la optimización del sistema, no obstante, en el capítulo 5 y 6, se exponen diferentes pruebas de fiabilidad.

4.3. Implementación del Sistema

Esta sección corresponde al *Ciclo de Diseño*, referente a la implementación del sistema. La primera parte de esta sección define al sistema UAV, que está directamente relacionado con la segunda parte de la sección, relativo al sistema de localización. En otras palabras, el sistema UAV da inicio al objetivo, que es posicionado por el sistema de localización.

4.3.1. Sistema UAV-Módulo de vuelo

Esta primera sección es indispensable para la implementación del sistema, ya que corresponde al objetivo a posicionar. Este sistema es denominado módulo de vuelo o emisor, ya que el vehículo utilizado emite ciertos parámetros de medición para su correspondiente estimación de posición.

4.3.1.1. Análisis del CX-10WiFi

Este módulo contiene la implementación y funcionalidad del sistema UAV, donde el drone CX-10W es responsable de volar alrededor de los objetos y al mismo tiempo tomar fotos del entorno o de la entidad sobrevolada de forma autónoma. El sistema se desarrolla en un ordenador con procesador Intel core i7 con sistema operativo Windows 10, e instalado en un smartphone rootead⁵ OnePlus2.

El vehículo CX-10W actúa como un punto de acceso (AP), que brinda una red Wi-Fi denominada “CX-10WD-XXXXXX”, donde la serie de Xs es un código característico de cada drone. A esta red el usuario se conecta por medio de la aplicación propia del drone, conocida como “CX-10WiFi”, que permite el manejo del drone, la toma de fotos, videos, entre otros. Sin embargo, el drone por ser controlado por una aplicación oficial, no cuenta con ningún protocolo de comunicación documentado, esto da origen al estudio e implementación de diferentes herramientas.

El primer proceso utilizado es la ingeniería inversa, que tiene como fin determinar el protocolo de comunicación utilizado, para esta solución se utiliza la aplicación oficial en un *smartphone Android*, además se emplea un sniffer⁶ de tráfico denominado *Packet Capture*, herramienta utilizada en la captura de paquetes de red (Shirts, 2017). Posteriormente se obtiene paquetes transmitidos entre celular-drone, al analizarlo se observa que el *drone* utiliza dos canales de comunicación:

Protocolo TCP(Transmission Control Protocol)

- Transmisión de vídeo
- Puerto: 8888

⁵ Root: Las aplicaciones ingresan a diferentes partes del sistema operativo ocultas por el fabricante. (Android, s.f.)

⁶ Sniffer: Analizador de protocolos.

Protocolo UDP(User Datagram Protocol)

- Recibir los datos del control
- Puerto: 8895

A más de la información anterior se describe la dirección IP (Internet Protocol) del vehículo que es 172.16.10.1, esta dirección es constante en cualquier vehículo de ese modelo. A continuación, se describe la comunicación TCP y UDP (ver Figura 4.4).

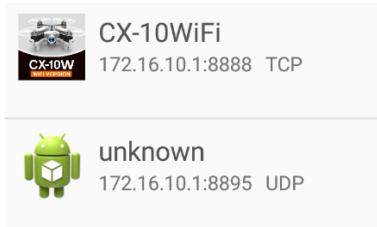


Figura 4.4. Paquetes TCP y UDP- Packet Capture

- **Comunicación TCP**

La comunicación TCP es utilizada en la transmisión de video, los paquetes cambiados por el protocolo se observa una comunicación síncrona bidireccional en un inicio. Los paquetes transmitidos por el *smartphone* tienen un tamaño constante de 106 bytes con una serie de 18 paquetes a cada ejecución, por otra parte, los paquetes transmitidos por el drone varían en su tamaño. Después de la comunicación bidireccional, el vehículo envía paquetes indefinidos con dimensiones variadas.

- **Comunicación UDP**

La comunicación UDP permite observar la existencia de una comunicación unidireccional entre el *smartphone* y el *drone*, donde los comandos de control son enviados a través de este protocolo, por medio de paquetes. Cada paquete tiene un tamaño fijo de 8 bytes con la siguiente estructura:

- **Byte 1:** constante, con un valor de 204 (0xCC);
- **Byte 2:** eje horizontal (0 hasta 255);
- **Byte 3:** eje vertical (0 hasta 255);
- **Byte 4:** acelerador (0 hasta 255);
- **Byte 5:** rotación (0 hasta 255);
- **Byte 6:** estabilidad (0 hasta 255), puede quedar en 0;

- **Byte 7:** byte de control. Resulta de la operación XOR en los bytes 2 hasta 6;
- **Byte 8:** constante. Tiene siempre el valor 51 (0x33).

0xCC	Horizontal	Vertical	Acelerador	Rotación	Estabilidad	Control	0x33
------	------------	----------	------------	----------	-------------	---------	------

A continuación, un ejemplo de un paquete de datos enviados por la aplicación cuando los ejes están centrados y tiene una aceleración que se encuentra en 0.

0xCC	0x7F	0x7F	0x00	0x7F	0x00	0x7F	0x33
------	------	------	------	------	------	------	------

Para conocer la estructura anterior se realizó una serie de pruebas donde al presionar los controles uno por uno, se verifica cierto patrón en los paquetes. Los resultados mostraron que el contenido de los paquetes variaba de acuerdo con los comandos introducidos en la aplicación, en la siguiente Figura 4.5 muestra un ejemplo de las capturas de tráfico, donde se aprecia el contenido de los paquetes en formato hexadecimal.



Figura 4.5. Captura de paquetes UDP

Como se observa en la figura anterior el primer y último byte se mantienen constantes, es decir el primer byte tiene el valor de 0xCC y el último valor 0x33 en formato hexadecimal. Para el estudio de los paquetes se creó un script en *Ruby*⁷, este lee la información exportada por la aplicación de análisis de tráfico, donde se visualiza gráficos que muestran la variación de los valores de los bytes con el tiempo. Al mover cada uno de los ejes a la vez, se analiza los paquetes, que permite llegar a la información necesaria que debe ser transmitida para el manejo del drone a través del sistema UAV. Con este conocimiento se llega a la conclusión de los valores que pueden ser utilizados para el control del drone, este detalle se define en el segundo módulo “Sistema de Localización”.

⁷ Ruby: Lenguaje de programación dinámico y de código abierto. (Matsumoto, 2016)

4.3.1.2. CX-10WiFi controlada por Aplicación Android

Esta sección define la creación de una aplicación Android con el objetivo de interaccionar con la aplicación de control del drone, que permita la toma automática de fotos. Debido a la inexistencia de un Kit de desarrollo de software (Software Development Kit, SDK) o una interfaz de programación de aplicaciones (Application Programming Interface, API) disponibles para este caso, se lleva a cabo la inyección de código en la aplicación del drone, que es posible con la *Framework Xposed*⁸.

La Framework Xposed actúa en la base del sistema operativo Android, a través de este sistema las aplicaciones son iniciadas por el servicio *Zygote*⁹, por medio del Xposed se reemplaza ese servicio por uno que actué como puente de acceso a las aplicaciones, a través de una biblioteca. Esta biblioteca permite interceptar llamadas a métodos de cualquier aplicación Android, para este proceso es necesario tener conocimiento de la estructura de la misma.

En la aplicación del drone como se muestra en la Figura 4.6 existe un botón que permite al usuario tomar fotografías, mediante la Framework se intercepta el método invocado para que posteriormente se ejecute el mismo método bajo demanda.



Figura 4.6. Aplicación del control del drone

En el SDK del Android todos los componentes visibles son vistas (views) representadas por IDs diferentes y únicos, cada una de ellas tiene múltiples propiedades, una de ellas es un oyente (listener) que notifica siempre que se haga click en la vista. Esta propiedad se define a través

⁸ Framework Xposed: Permite el cambio de comportamiento del sistema y diferentes aplicaciones, sin tomar en cuenta ningún archivo de aplicación empaquetada de Android (Android Application Package, APK). (Xposed Module Repository, 2014)

⁹ Zygote: Proceso del que derivan todas las aplicaciones de Android. (Gupta V. , 2016)

del método `setOnItemClickListener`. Al interceptar este método del oyente se convierte en objeto tipo `OnItemClickListener`, que es almacenado para su posterior uso.

Al existir múltiples vistas en la aplicación, es necesario reconocer el oyente de la vista correcta a través de los IDs, por tanto, se prueba las vistas una por una hasta que el obtenido corresponda a la vista pretendida.

Mediante la solución anterior se logra obtener el ID de la fotografía, esto da inicio al desarrollo de un servicio que es ejecutado de fondo. Este servicio crea el servidor TCP que se accede por USB por el puerto 59900. El celular es conectado al computador, que envía el comando de tomar fotografía al celular y el servicio recibe el comando, que notifica al oyente para que sea tomada la foto. Sin embargo, el oyente no accede directamente al objeto, por esta razón se utiliza un sistema de difusión del Android, que permite enviar comandos entre procesos e invocar al oyente sin tener conocimiento directo de este. Finalmente, la imagen obtenida es enviada al computador.

4.3.2. Sistema de Localización

Esta segunda sección se encuentra ligada directamente con el sistema anterior, debido a que corresponde al objetivo a ser localizado por este sistema de posicionamiento. A continuación, se describe los dos tipos de módulos presentes: (i) Envió y recepción de señales; y (ii) posicionamiento.

4.3.2.1. Módulo de envío y recepción de datos

Este módulo conforma la implementación y funcionamiento de los nodos sensores que forman parte del WSN. Cada uno de los nodos está constituido por dos componentes: (i) un módulo ESP8266-01, denominado transmisor que envía información al ordenador; y (ii) un módulo ESP8266-12E, designado como receptor para que reciba la intensidad de la señal del drone. La razón para que existan dos antenas se debe a una limitación, donde la frecuencia de actualización de la lista de redes no es inmediata. Este problema se da cuando una antena ESP8266 no se encuentra conectada a una determinada red, por tanto, no puede conocer la potencia a menos que primero se actualice la información. Este proceso tiene una demora de 2 segundos, siendo impracticable a las necesidades existentes.

Continuando con la implementación del nodo se le suma otros dispositivos que permiten optimizar el prototipo: (i) una antena Yagi, y (ii) dos servomotores. Estos últimos se integran a

piezas (Thingiverse, 2014), que forman una pequeña mano robótica. Finalmente, para la respectiva alimentación del nodo se añade una pequeña batería móvil recargable. Los dispositivos antes nombrados han sido descritos en el CAPITULO 3. A continuación, se define las tareas que cada elemento realiza al interactuar entre sí.

4.3.2.1.1. Módulo ESP8266-01 – Transmisor

El módulo ESP-01 es responsable de enviar la información al ordenador como se observa en la Figura 3.17, es un pequeño dispositivo sencillo que cumple los requisitos necesarios (transmisión de datos por Wi-Fi). Este modelo contiene 2 pines GPIOs, que son utilizados para una comunicación con otros sensores, por ejemplo, RX(recepción) y TX (transmisión). Otra característica principal es la alimentación de sólo 3.3V y tiene la capacidad de ser programada lo que permite el desarrollo de pequeñas aplicaciones, la manera de hacerlo es a través del Arduino IDE, que da acceso a una larga variedad de librerías que aceleran el proceso de desarrollo.

En el sistema de localización implementado, este componente realiza una comunicación entre el módulo receptor y el ordenador central. La comunicación con el receptor se realiza mediante una comunicación serie, mientras que la conexión al computador se hace mediante comunicación inalámbrica Wi-Fi.

En el siguiente flujograma de la Figura 4.7 se muestra el proceso que realiza el módulo trasmisor, donde al abrir la conexión serial del receptor permite la transmisión de datos entre los dos. Posteriormente, se conecta al router a través del identificador de conjunto de servicios (Service Set Identifier, SSID) de red. En este caso el SSID es denominado “thesis-katty”, que se encuentra definido en la programación de la antena, en caso de ser necesario debe ser cambiado el código y por tanto la antena sebe ser programada. Después de realizar la conexión con éxito se crea un servidor UDP en el puerto 80. Esto permite que el ordenador se conecte a la antena y lograr así el cambio de información, hasta que exista un paquete que sea enviado al servidor. Así que, al recibir el paquete este almacena cierta información como la dirección IP y el puerto del cliente que se conectó, a más de esto se recibe un paquete UDP que contenga la información del nombre de la red (Red del drone “CX-10WD-XXXXXX”) a la cual se debe conectar el módulo receptor ESP-12E por una comunicación vía serial. A continuación de define el contenido completo del paquete, que deben ser enviados en el respectivo orden:

- Información enviada.
- Número de bytes correspondientes al nombre de la red.
- Nombre de la red.

Un ejemplo de los datos enviados puedes ser:

“OK”	13	“CX-10W-01cd6d”
------	----	-----------------

El paquete anterior debe contener un aviso de que existe una conexión Wi-Fi “OK”, seguido del número de bytes que constituye el SSID de la red del drone y el SSID del vehículo. Después de enviar estos datos la antena espera hasta que se reciba los datos por serial y envía información en un paquete UDP al cliente conectado, este proceso entra en un bucle infinito.

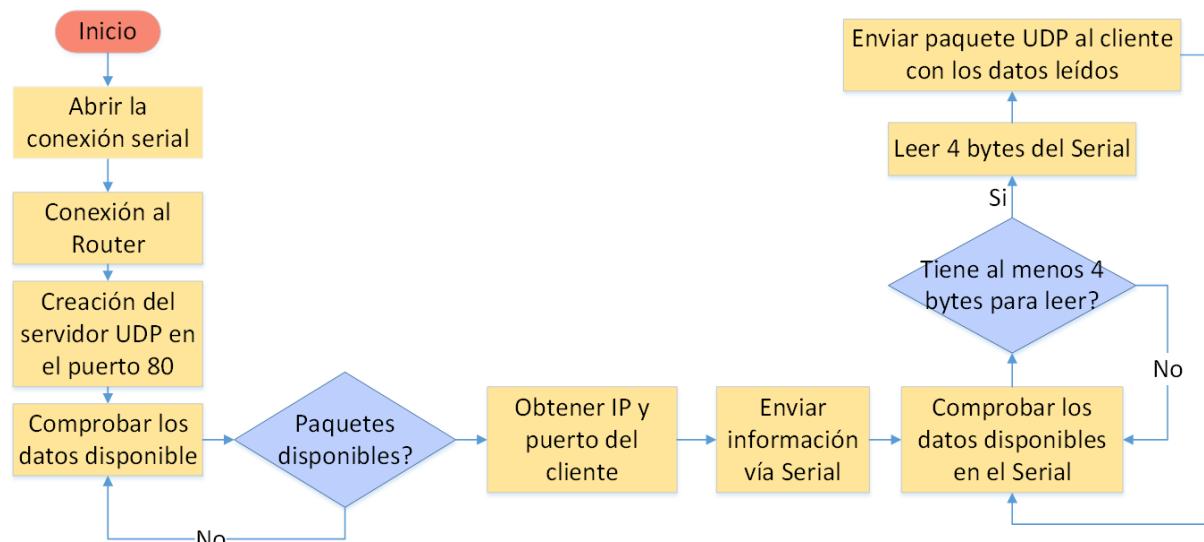


Figura 4.7. Funcionalidad de módulo Transmisor

En este bucle se espera hasta que exista datos en la comunicación serie, que debe contar con al menos 4 bytes para que sean leídos. Estos 4 bytes contienen la siguiente información:

Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4
Toma el valor 0 o 1. Indica si son datos resultados de toda una búsqueda hecha por las antenas o es información instantánea.	El valor del ángulo de la antena horizontal. 20° a 160°	El valor del ángulo de la antena vertical. 45° a 135°	El valor del RSSI de la red del drone, leído por el receptor. 0 a -100

Finalmente, al ser leídos estos bytes, se crea un paquete UDP que se transmite mediante Wi-Fi al cliente. Para empezar de nuevo el proceso, es necesario reiniciar el módulo.

4.3.2.1.2. Módulo ESP8266-12E – Receptor

El módulo ESP8266-12E detecta la red emitida por el drone y la lectura de su RSSI. Como se observa en la Figura 3.16, el dispositivo ESP-12E cuenta con algunas mejorías comparado con el ESP-01, a esto se le atribuye un mayor número de pines GPIOs. La tarjeta de desarrollo se basa en el módulo ESP-12E, que brinda un conjunto de características que permite el desarrollo de prototipos. Entre aquellas características se incluye: pines macho de fácil uso, Diodos emisor de luz (Light-Emitting diodes, LEDs) y batería portátil soportada con pilas.

Sin embargo, para llegar a la conclusión de usar el ESP-12E se realizó una serie de pruebas, donde el ESP-01 presenta una baja tasa de actualización del RSSI de la red, aproximadamente cada 5 segundos, que se define como no apto para el desarrollo de este sistema. Por otro lado, el modelo ESP-12E muestra una actualización instantánea. Siendo este modelo un poco más caro, se utiliza el modelo-01 solo para la comunicación con el ordenador sin presentar limitación alguna. Otra razón de seleccionar el ESP-12E es su número de pines que da opción a controlar los servomotores que direccionan la antena.

En la Figura 4.8 se muestra un flujograma que describe el proceso que realiza el módulo receptor, donde al abrir la conexión serie al transmisor, se espera recibir el texto “OK”. Este texto define el principio de la comunicación entre la parte transmisora y receptora. Inmediatamente se lee el primer byte, que indica la cantidad de bytes restantes que debe leerse. Esta secuencia de bytes contiene el SSID de la red a la cual se conecta el módulo, que en este caso es la red del drone. Después de dar lectura a todos los datos, se conecta a la red mediante el SSID hasta lograr una conexión exitosa. Una vez conectado, el controlador entra a un bucle infinito que da la orden de movimiento al servomotor, donde en cada posición se lee el valor del RSS, que es enviado al transmisor junto con el ángulo correspondiente a la posición actual. La transmisión de esta información es el mismo procedimiento como cuando la información es recibida por el transmisor. A esto se le suma la transmisión de un arreglo de 4 bytes que contiene la siguiente información:

Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4
Toma el valor 0 o 1. Indica si el conjunto actual de datos representa o no el valor máximo detectado.	El valor del ángulo de la antena horizontal detectado. 20° a 160°	El valor del ángulo de la antena vertical detectado. 45° a 135°	El valor del RSSI de la red del drone, leído por el receptor detectado. 0 a -100

Durante el movimiento de los servomotores, la información es transmitida en cada posición, no obstante, al final de cada vuelta, se envía un paquete que contiene la información de la posición con el mayor valor de RSS con su ángulo correspondiente. Este proceso de movimiento y transmisión se repite de manera infinita. La aplicación tiene conocimiento a que antena corresponde cada paquete de datos, ya que cada una tiene su propio hilo, y por tanto, cada hilo tiene el identificador de la antena a la que corresponde.

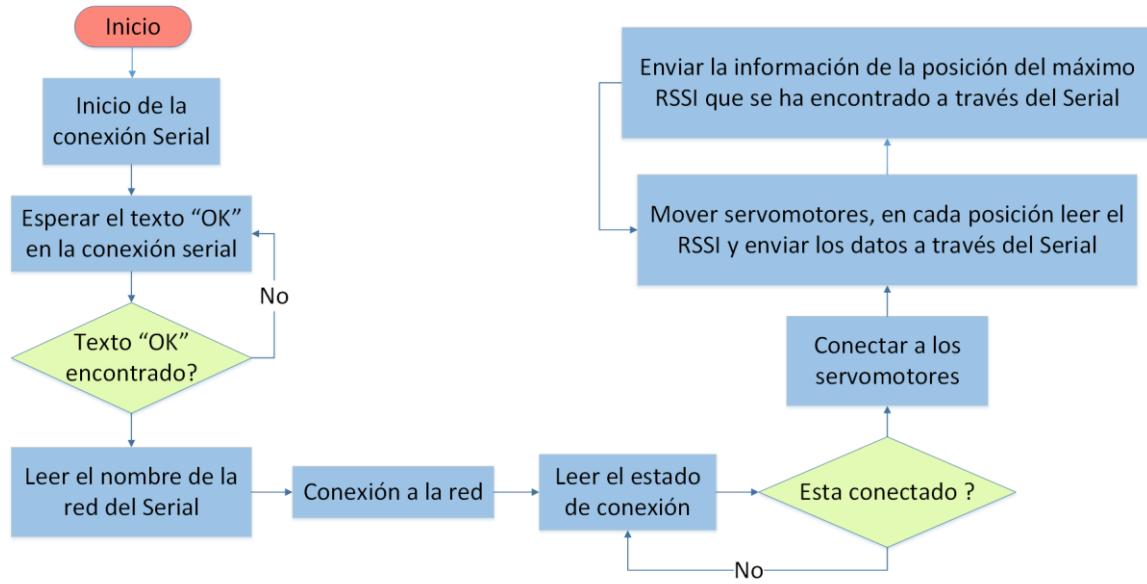


Figura 4.8. Funcionalidad del módulo Receptor

4.3.2.1.3. Módulo de localización Wi-Fi

El módulo de localización inalámbrica Wi-Fi esta conformado por dos tipos de elementos que permiten la comunicación inalámbrica: (i) módulo ESP8266-01 (transmisor) y (ii) módulo ESP8266-12E (receptor). Cada uno de ellos tiene diferente estructura, con iguales comandos de programación. A estos elementos se le suma dos dispositivos que componen al nodo sensor para su optimización: (i) 2 Servo motores y (ii) una antena Yagi. Finalmente a esta unidad se le suma una pequeña batería móvil de manera recargable (ver Figura 4.9).

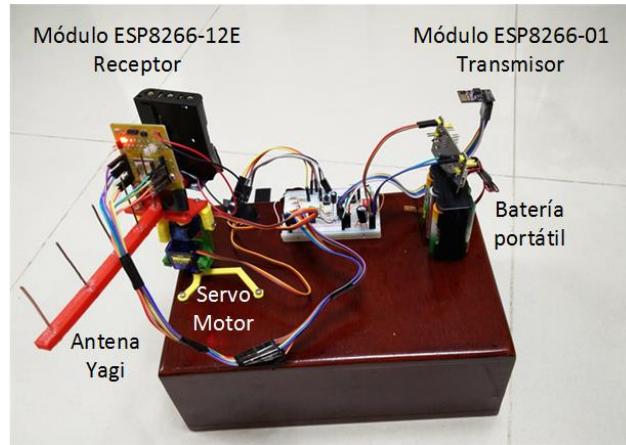


Figura 4.9. Prototipo del Módulo de Localización Wi-Fi

4.3.2.1.4. Modularidad de los componentes

La Figura 4.10 muestra el diagrama electrónico del prototipo expuesto en la sección anterior, donde se aprecia que el circuito se encuentra en protoboard debido a pruebas en cuestión de movimiento 3D que son parte del trabajo a futuro. A pesar de ello su tamaño es pequeño, portable y está localizado en una base estable de madera. Aunque el circuito no esté impreso en una placa electrónica, esta se encuentra probado tanto en la modulación real como la realizada en el Software Fritzing.

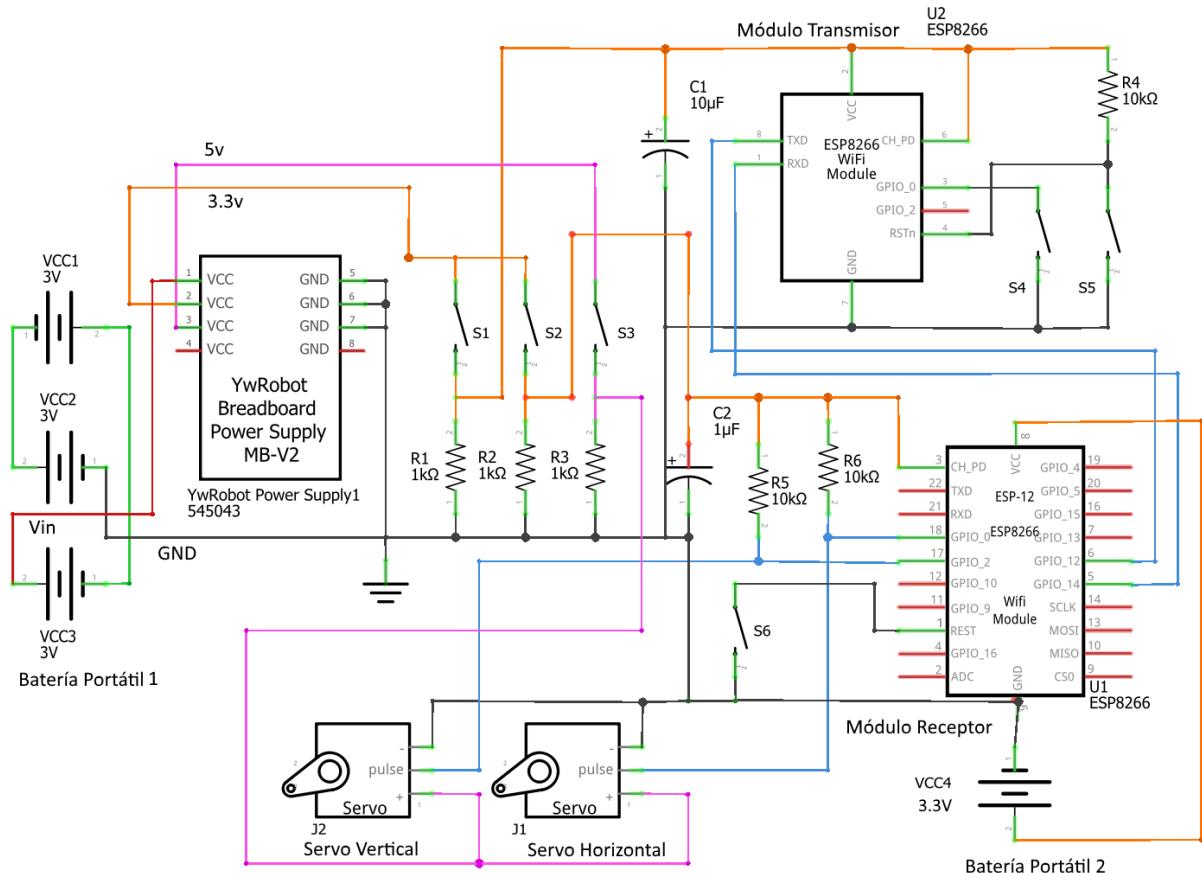


Figura 4.10. Diagrama electrónico del nodo sensor

Como se puede observar el circuito cuenta con dos baterías portátiles una de 9v y otra de 3.3v. A esto se utiliza 6 switches, dos de ellos controlan un voltaje de 3.3v, uno el de 5v, dos más son utilizados para resetear tanto del módulo ESP-01 como el ESP-12E y el último es empleado como flash del ESP-01. Finalmente están presentes 6 resistencias que limitan el flujo de corriente debido al uso de módulos que específicamente precisan de 3.3v.

4.3.2.2. Módulo de posicionamiento

Este módulo define la estimación de localización de un objeto, a través de técnicas y métodos de posicionamiento, que se encuentra implementado en un ordenador Intel Core i7 con un sistema operativo Windows 10 y el programa Netbeans IDE 8.2. Esta herramienta utiliza Java versión 1.8.0_102.

El funcionamiento de este módulo contiene el almacenamiento y recepción de datos que permiten ubicar gráficamente la posición de cada nodo sensor. Estos datos son coordenadas comparadas entre sí, para obtener el punto inicial que esté más cerca del valor (0, 0). Al contar con la posición inicial este permite ubicar al resto de puntos, sin embargo, para su dirección se debe tener en cuenta los ángulos definidos que apuntan al objeto, cuando la antena se encuentra en los 90 grados (punto central). La información anterior da lugar al procesamiento de datos a través del método de posicionamiento AoA. Los resultados de la técnica AoA son presentados en una gráfica a través de puntos que representan a la estimación del punto objetivo, además, se muestra las coordenadas de cada uno de ellos.

En el siguiente flujograma de la Figura 4.11 describe el proceso que realiza el módulo de posicionamiento, donde al conectarse las antenas se envía el SSID de la red del drone, que espera por la información de las antenas y al llegar el paquete de información completo del ángulo máximo se almacena esta información. Después de recibir los datos de todas las antenas calcula las líneas formadas por las antenas y posteriormente las intersecciones. Al existir por lo menos 2 intersección, existe la opción de encontrar una posición. Finalmente se calcula la posición, a continuación, se calcula los comandos para el drone y se envían los comandos.

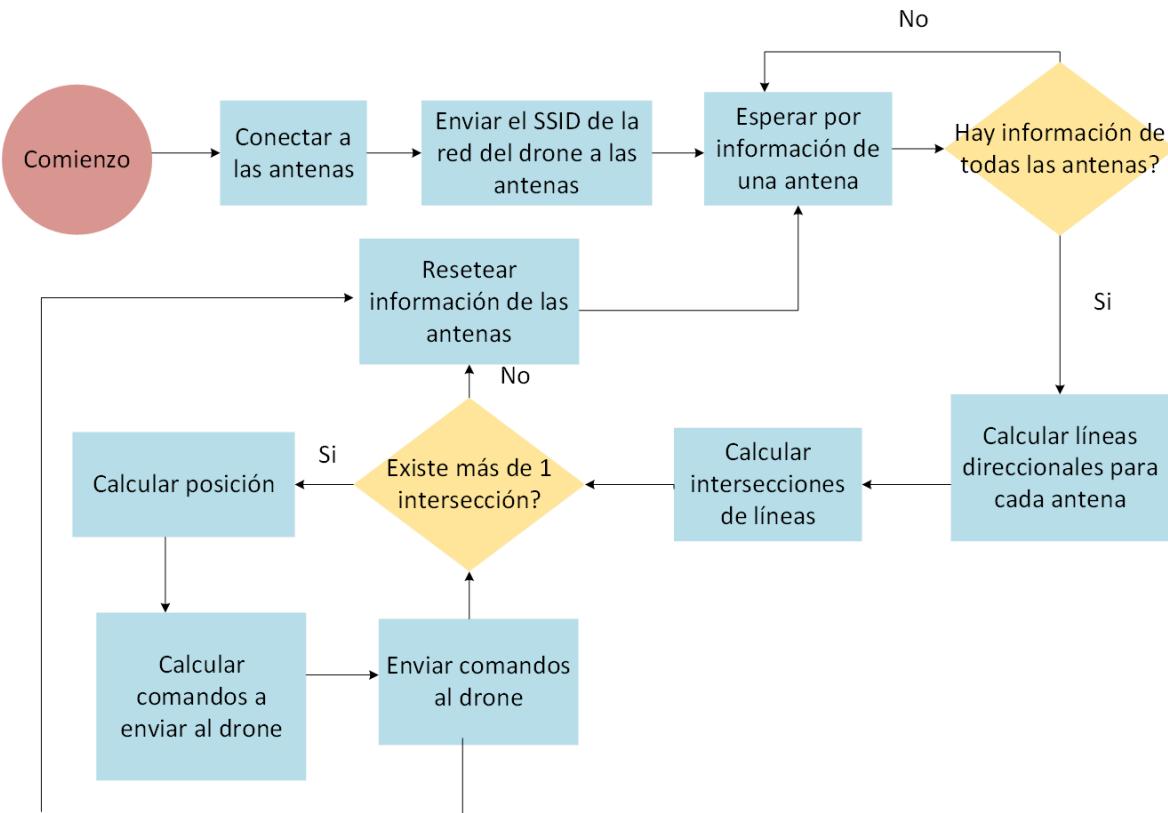


Figura 4.11. Funcionalidad del módulo de posicionamiento

En el CAPÍTULO 3 se detalla en la sección de Triangulación el método de Angulación también conocido como AoA, ahí se encuentra definido como funciona esta técnica, a esto se le suma el proceso de estimación a través de ecuaciones. A continuación, se describe un ejemplo claro de la optimización del método de localización implementado, que permite evaluar la investigación a través de la métrica Distancia Euclidiana.

4.3.2.2.1. Algoritmo de localización AoA

En el CAPÍTULO 3 se detalla el cálculo básico de posicionamiento con solo dos nodos, a través del método angular. Sin embargo, en la práctica se recomienda el uso de más de dos puntos referencia ($P_R \geq 3$), que permita disminuir el error de posición.

En el presente proyecto se utiliza tres nodos sensores como muestra la Figura 4.12. Donde primero se calcula el máximo número de intersecciones (N_i), mediante la siguiente Ecuación 4.1:

$$N_i = \frac{P_R!}{2 \times (P_R - 2)!} = \frac{P_R(P_R - 1)}{2}$$

Ecuación 4.1. Máximo número de intersecciones

La Figura 4.12 al contar con tres nodos referencia, esto da como resultado tres puntos de intersección ($N_i = 3$), que corresponden a $M_{N_i-1} (X_{N_i-1}, Y_{N_i-1})$ donde $N_i = 1, 2$ y 3 . Como se observa se utiliza información redundante, para cada uno de los puntos estimados, estos nodos son representados por la solución: $(X_{i-1}, Y_{i-1}) \neq (X, Y)$, esto significa que los puntos no coincidirán con el nodo objetivo, ya que son utilizados para localizar el *área de incertidumbre de intersecciones* donde puede estar ubicado el nodo objetivo $P(X, Y)$ (Passafiume, Maddio, Lucarelli, & Cidronali, 2016).

El área de incertidumbre de intersecciones limita la ubicación del punto objetivo, esto reduce su espacio de localización, que disminuye el error de posicionamiento. La optimización del sistema es la reducción en el área de incertidumbre, denominado como *área de incertidumbre mínima*, así se delimita la posición del punto estimado como se observa en la Figura 4.12. Para una mayor apreciación la Figura 4.13 muestra tal área, posteriormente se calcula la estimación final de localización.

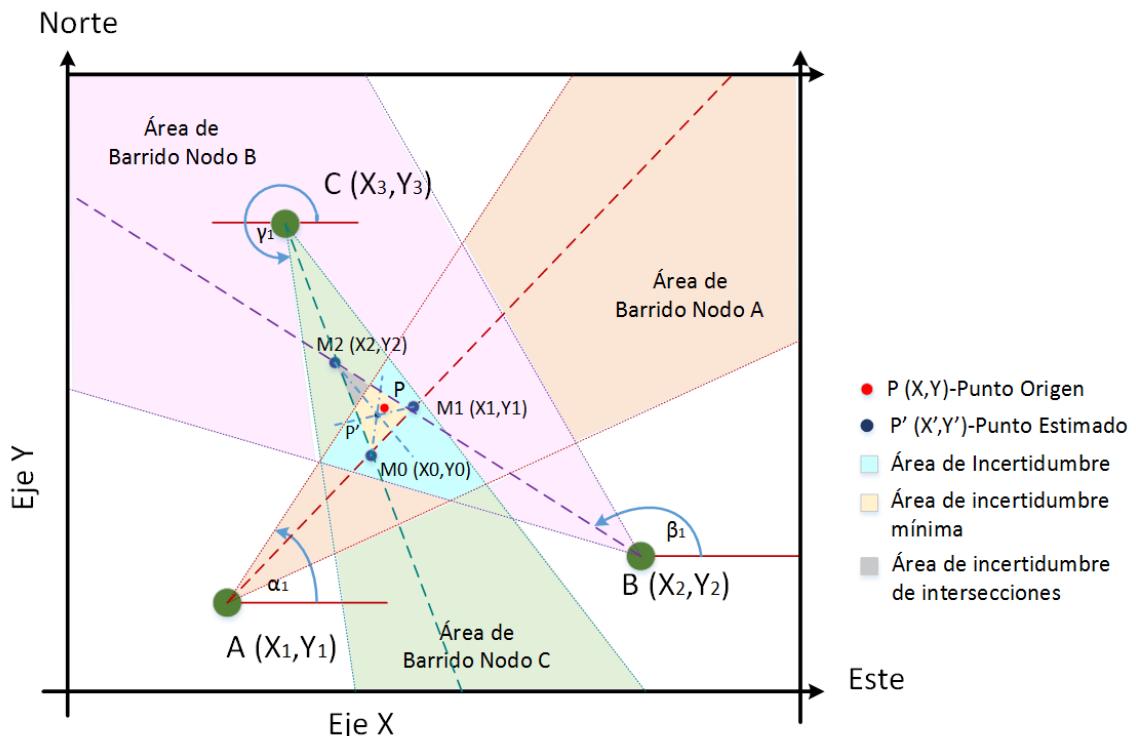


Figura 4.12. Técnica AoA – 3 nodos

- **Agregación de estimación**

El cálculo de estimación en la Figura 4.13 se obtiene a través del baricentro o centroide del polígono. El propósito de este método es calcular el centro de un polígono no-auto-intersección cerrada, que coincide con su centro de gravedad, donde el peso se divide uniformemente a

través de la forma geométrica. Esta técnica es una solución al uso frecuente del algoritmo de triangulación baricentro, ya que este reduce la confiabilidad de estimación porque entrega un peso equitativo a cada uno de los puntos o vértices, por tanto, mientras más sea el número de puntos no fiables el error de posicionamiento se verá afectado (Patel & Patel, 2016). En otras palabras, se aumenta la falta de control en las estimaciones dadas por el algoritmo AoA, dado este motivo se delimita el área de incertidumbre de intersecciones a mínima. Para una mayor comprensión de este algoritmo se describe a continuación:

El polígono convexo viene definido por $N_i = n$ número de vértices, cuyas coordenadas se representan como $M_{n-1} (X_{n-1}, Y_{n-1})$ y su punto centro viene dado por $P' (X', Y')$. Para su cálculo correspondiente se determina a través del área, que es determinado a través de la Ecuación 4.2.

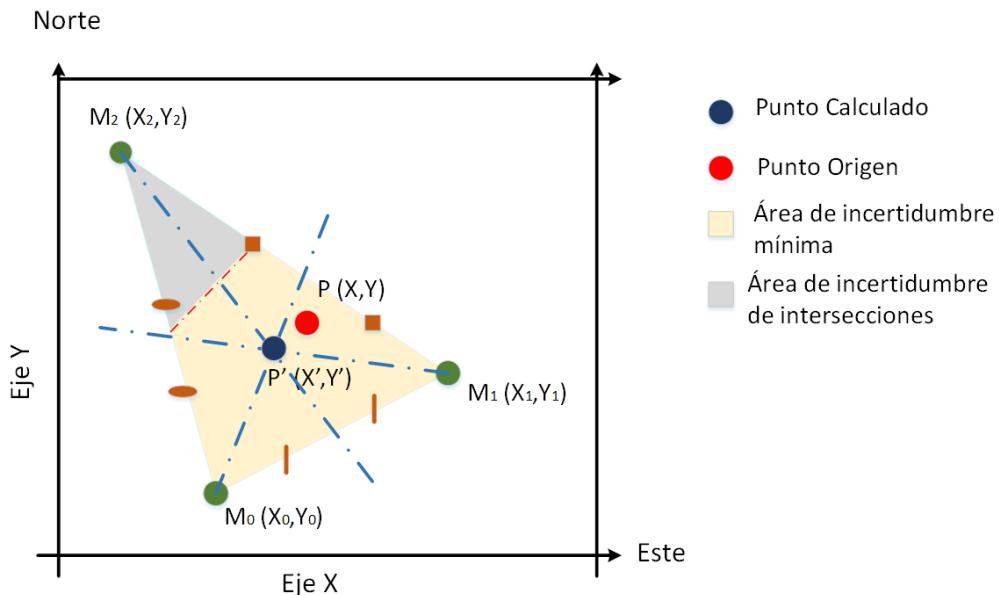


Figura 4.13. Área de Incertidumbre-AoA

$$A = \frac{1}{2} \times \sum_{i=0}^{n-1} (x_i * y_{i+1} - x_{i+1} * y_i)$$

Ecuación 4.2. Área de un polígono convexo

Posteriormente se calcula las coordenadas del centro de gravedad del polígono, mediante las siguientes expresiones algebraicas (ver Ecuación 4.3 y Ecuación 4.4).

$$X' = \frac{1}{6 * A} \times \sum_{i=0}^{n-1} (x_i + x_{i+1}) * (x_i * y_{i+1} - x_{i+1} * y_i)$$

Ecuación 4.3. Coordenada X-Centroide del polígono convexo

$$Y' = \frac{1}{6 * A} \times \sum_{i=0}^{n-1} (y + y_{i+1}) * (x_i * y_{i+1} - x_{i+1} * y_i)$$

Ecuación 4.4. Coordenada Y- Centroide del polígono convexo

- **Estimación mediante el peso de puntos**

Para optimizar la estimación del posicionamiento es necesario condicionar al sistema, es decir que cada nodo decide a que punto dar su peso, en este caso será al máximo RSSI que se encuentra cercano al nodo objetivo. Sin embargo, en ocasiones puede estar su peso lejos del nodo referencia, esto se debe a diferentes causas como el multipath, condiciones climáticas u obstáculos. A continuación, se muestra un ejemplo de las estimaciones erróneas de localización, donde una de las rectas no se interseca y por tanto no existe punto de intersección que forme un polígono cerrado. En este caso se discrimina los puntos de intersección localizados, para volver a tomar el RSS.

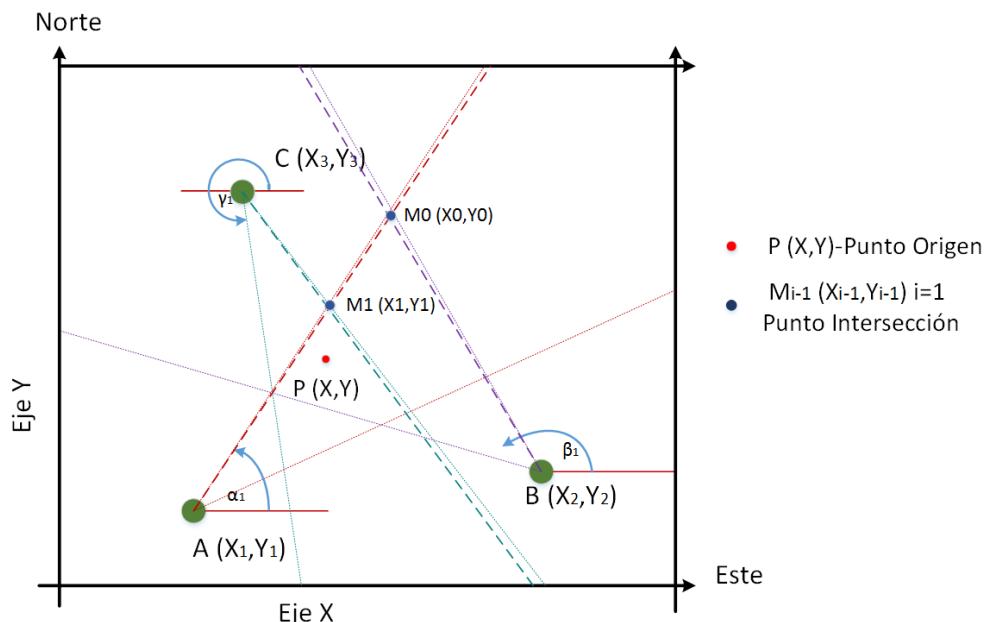


Figura 4.14. Estimación-peso a los nodos

La Figura 4.14 se denomina paralelismo, debido a que su nodo estimado resulta en la frontera del rango que el nodo recorre, una cantidad mínima de estimación obtiene un desplazamiento lineal fuera del intervalo. Esto lleva a condicionar el sistema tanto en software como hardware, descrito en las secciones anteriores.

- **Estimación de los nodos**

Esta sección describe la localización del punto estimado final ($P'' = (X'', Y'')$), donde se posiciona N_p número de posiciones estimadas, es decir que el sistema tiene la característica de buscar un número infinito de posiciones estimadas, a través de los cálculos anteriormente definidos.

Una vez localizado cada uno de los puntos ($P'_i = (X'_i, Y'_i)$ donde $i = 0, 1, \dots$), se realiza una media aritmética tanto de la coordenada X'' como la Y'' (ver Ecuación 4.5 y Ecuación 4.6)

$$X'' = \frac{1}{N_p} \sum_{i=0}^{N_p} X'_i = \frac{X'_0 + X'_1 + \dots + X'_{N_p-1}}{N_p}$$

Ecuación 4.5. Coordenada X-Punto Estimado Final

$$Y'' = \frac{1}{N_p} \sum_{i=0}^{N_p} Y'_i = \frac{Y'_0 + Y'_1 + \dots + Y'_{N_p-1}}{N_p}$$

Ecuación 4.6. Coordenada Y-Punto Estimado Final

La ventaja de usar AoA es la estimación de posición, ya que no cuentan con la necesidad de usar un gran número de dispositivos tanto para la medición en 3D como la 2D, además de no necesitar una sincronización del tiempo. Sin embargo, se conoce que para el uso de esta técnica es necesario hardware relativamente grande y complejo(Liu, Banerjee, & Liu, 2007).

En la definición anterior se detalla a pasos los métodos y ecuaciones que son utilizados en el módulo de posicionamiento a través del modelo matemático expuesto. Por otro lado se comprueba que el uso de este método exige un hardware relativamente pequeño y sin mayor complicación de procesamiento.

4.3.2.3. Aplicación de Control

Esta última sección es referente al punto central de todo el sistema, es decir al ordenador central que permite monitorear toda la aplicación, que da opción al usuario a definir una ruta que debe seguir el drone y verificar el proceso, además de lograr la comunicación con los diferentes componentes del sistema como los nodos sensores, la aplicación móvil, servicio de fotogrametría y el drone. La programación de esta aplicación fue desarrollada en Java, lo que permite ser utilizado en los diferentes sistemas operativos conocidos, que cuenten con la instalación de una JVM (Java Virtual Machine).

A continuación, se describe la aplicación desde su interfaz gráfica hasta la modularidad tanto de software como hardware en cuanto a los nodos sensores y su comunicación, que conforman la red de sensores inalámbricas. A esto se suma el servicio de fotogrametría que puede mostrar el entorno o un objeto sobrevolado.

4.3.2.3.1. Interfaz gráfica de localización

Esta primera sección muestra la interfaz gráfica de localización (ver Figura 4.15), donde es presentado un mapa que para su implementación se usa la API de Google Maps (GoogleDevelopers, 2017) y a esto se le suma la librería JxBrowser que presenta el mapa en la aplicación. Con esto, el usuario define la ruta que debe seguir el drone a través de múltiples waypoints, que da lugar a la localización de las posiciones de los nodos sensoriales, además de sus configuraciones. Estas configuraciones incluyen la dirección IP, ángulo relativo al eje horizontal direccionado al UAV, altura en metros y número atribuido internamente.

Está interfaz gráfica presenta tres opciones diferentes:

- **Draw Path:** Permite trazar el camino del drone o las posiciones donde se pretende tomar una fotografía mediante waypoints;
- **Place Antennas:** Habilita la posibilidad de ubicar las antenas de forma estimada;
- **Add Antennas:** Añade las antenas con mayor exactitud (latitud y longitud), a esto se le suma la dirección IP, ángulo y altura.

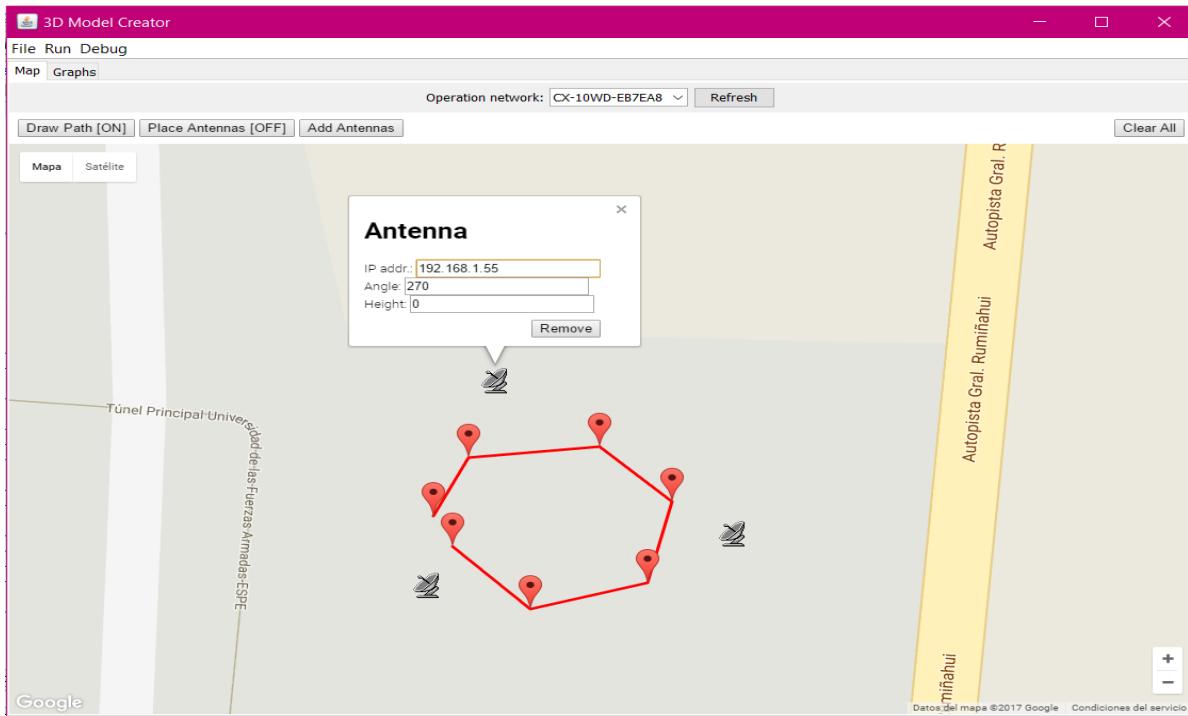


Figura 4.15. Interfaz gráfica de localización

Los waypoints son los puntos en las cuales el drone debe tomar una foto, existen otras características de la aplicación, donde es posible cambiar las posiciones de los puntos arrastrando y configurando con nueva información. El usuario puede seleccionar la red de operación, que indica la red a la cual los nodos se deben conectar (red distribuida por el UAV).

Al dar inicio al sistema, la interfaz gráfica presenta cuatro tipos de gráficos, que muestran los resultados relacionados entre la potencia y el ángulo para cada una de las antenas, a más de esto un gráfico que presenta la dirección encontrada por la potencia máxima de las antenas y la posición calculada del drone, como se observa en la Figura 4.16 las antenas son representadas por puntos y líneas de color rojo, azul y verde obviamente las antenas en el entorno real deben estar sobre un plano cartesiano que tengan similitud en distancias; el punto amarillo representa al drone y la ruta del mismo, igualmente los puntos y líneas color rosa representan los datos calculados. Finalmente, a un lado presenta una lista de puntos calculados a través de coordenadas como se muestra a continuación:

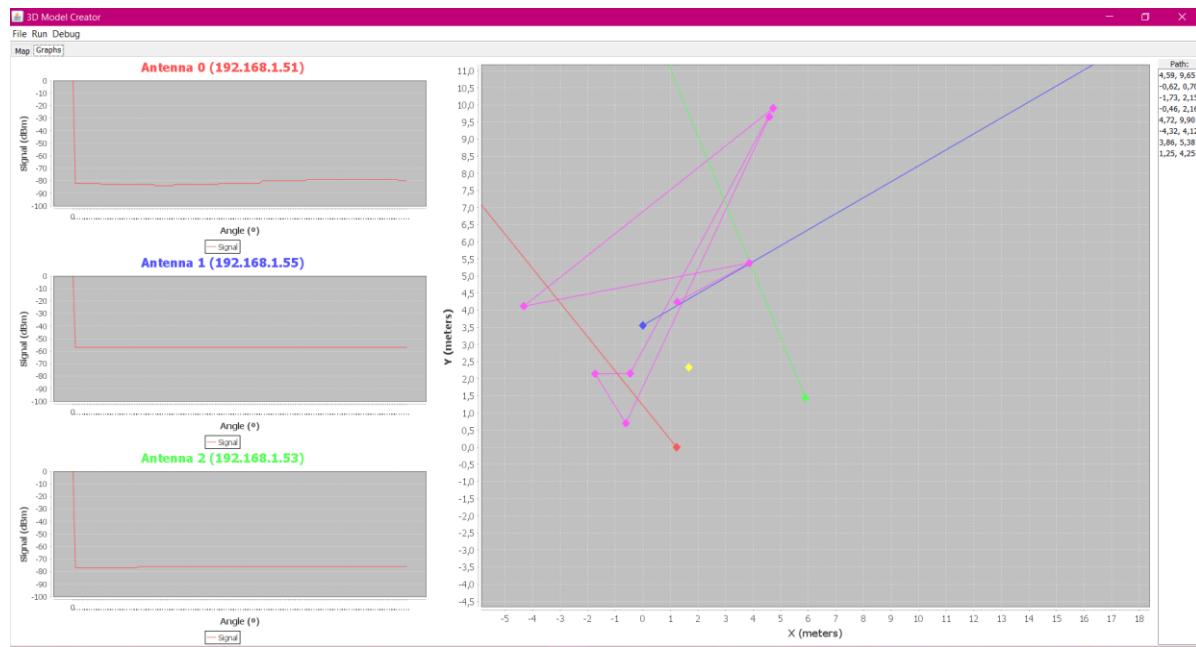


Figura 4.16. Interfaz gráfica-Presentación de resultados de forma gráfica y teórica

4.3.2.3.2. Integración de los Módulos

Esta segunda sección describe la integración de los módulos nombrados en la sección anterior. Donde define que parte hardware y software se pone en juego para la estimación del posicionamiento.

Después de definir la ruta y la red de operación empieza el proceso de control, que define un plano cartesiano 2D, siendo el origen el punto que contiene el menor valor de los componentes cartesianos de cada uno de los nodos. Por ejemplo, en la Figura 4.15 el origen sería la antena que se encuentra abajo y a la izquierda, pues contiene la menor latitud y longitud, en cambio si un nodo no contiene las dos coordenadas con menor valor, se selecciona la menor longitud del nodo que se encuentra a la izquierda y la longitud del punto que se encuentra abajo. De inmediato se realiza conexiones a los nodos sensores y al celular, a continuación, se detalla cada una de estas comunicaciones:

- **Conexión al celular**

La conexión al celular se hace a través del ADB (Android Debug Bridge) realizada por USB, implementada mediante sockets. Para que esta comunicación sea posible es necesario ejecutar el comando: *adb forward tcp:59900 tcp:59900*, que crea una comunicación entre el ordenador con el protocolo TCP puerto 59900 y en el smartphone con las mismas características. Al abrir la comunicación se crea una conexión al servidor desarrollado en la aplicación Android. Existe

la posibilidad de contar con otros dispositivos conectados al ordenador, la aplicación da al usuario la opción de seleccionar el dispositivo a utilizar, en esta situación el comando que abre esta comunicación es el `adb -s <dispositivo> forward tcp:59900 tcp:59900`, en donde `<dispositivo>` se refiere al ID del dispositivo seleccionado.

- **Conexión a los nodos sensores**

La comunicación con los nodos sensores se realiza a través de sockets por medio del protocolo UDP, cada una de las antenas ESP-01 debe contar con una dirección IP específica. Al principio del proceso, cada una de las antenas se le envía un paquete con el nombre de la red (drone) a la cual se debe conectar las antenas ESP-12E. Después de enviar el paquete, cada uno de los sockets espera por paquetes que contengan información de los ángulos y potencias de las antenas correspondientes. Este bucle se repite hasta que el usuario decida terminar el proceso.

Router

El router sirve de puente entre los nodos y el ordenador, donde las antenas deben estar conectadas al mismo computador, debido a que sería impráctico conectarse a la red de cada una de ellas. Por tanto, todas las antenas y el ordenador deben conectarse al mismo router para su comunicación. A esto se le atribuye previamente una dirección estática a cada uno de los nodos con el objetivo de no utilizar DHCP. Finalmente, esto habilita un acceso directo a esa información. A continuación, se detalla las configuraciones implementadas en el router:

- **Router:** TP-Link 300Mbps Wireless N Router TL-WR841N
- **SSID:** tesis-katty
- **Encriptación:** Ninguna
- **Dirección del Gateway:** 192.168.1.50
- **Máscara de red:** 255.255.255.0
- **DHCP:** Activo
- **Comienzo de las direcciones atribuidas por DHCP:** 192.168.1.60

Con las configuraciones anteriores, se obtiene un espacio de 9 direcciones (192.168.1.51 hasta 192.168.1.59) que puede ser atribuidas a las antenas. Por tanto, hay que tener en cuenta que esta implementación como está ahora no soporta contraseñas, ya que así acelera el desarrollo de la aplicación en esta fase inicial del proyecto. Aunque la implementación si puede soportar contraseñas y ser configurable en el futuro.

Al ejecutar las conexiones antes mencionadas, se envía información necesaria como el nombre de la red a la cual se deben conectar los nodos. Posteriormente se envía esta información, debido a que el proceso empieza un hilo, que escucha todos los datos transmitidos por los nodos. A cada paquete de información transmitido por una de las antenas se verifica el tipo de información recibida. Si este paquete indica la posición de donde se encuentra la mejor señal, se almacena esta información y al enviar la de todas las antenas, se calcula la posición del vehículo con aquellos datos, después de calcular la posición se actualiza los comandos que se envía al drone (vuelo bidimensional), de acuerdo con la ruta establecida para llegar al próximo punto de la ruta (distancia menor de 25 cm del punto definido). Este proceso se repite hasta llegar al último punto, donde el control da la orden al UAV, que realice el aterrizaje. Durante este proceso se visualiza la trayectoria efectuada por el drone, además de captar los gráficos de la señal de cada uno de los nodos. A continuación, este proceso puede ser visualizado por el flujo de la Figura 4.17.

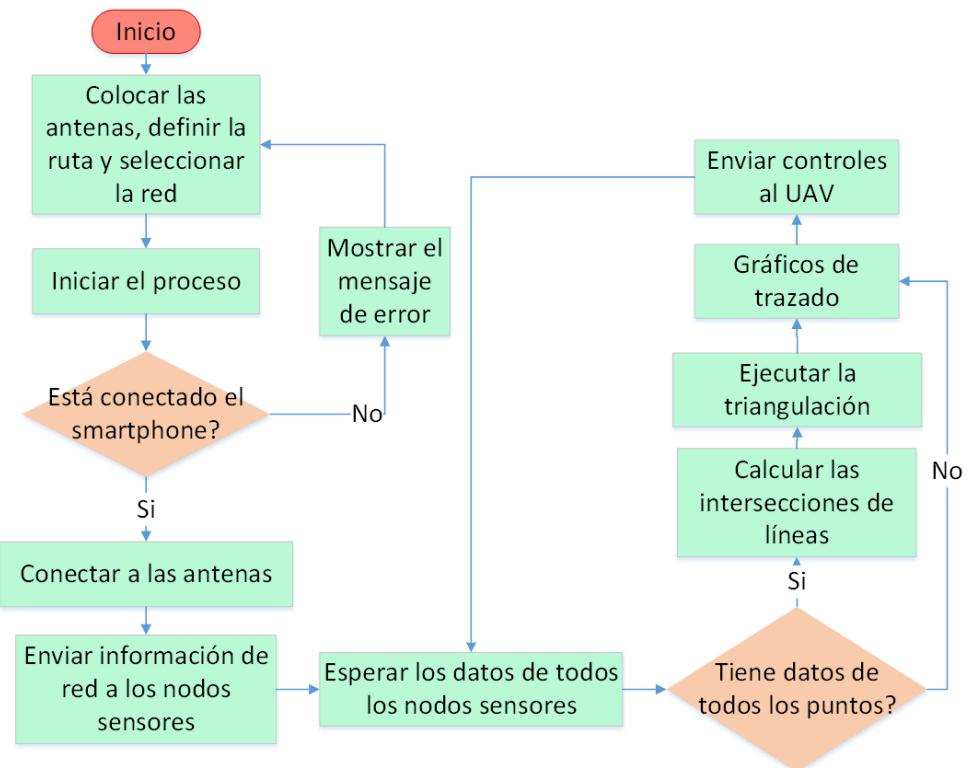


Figura 4.17. Funcionalidad Aplicación de Control

4.4. Análisis de Solución

Esta solución permite crear un sistema de localización para un UAV, que utiliza componentes de bajo costo y de fácil transporte. Su configuración es sencilla a pesar de los múltiples componentes que la constituyen. Uno de los problemas pasa por la alimentación, que a pesar

de que la gran mayoría de los componentes dispongan de baterías de bajas dimensiones, el router presenta un problema en ese aspecto.

El gran número de conexiones necesarias al computador puede presentar problemas. Por tanto, al ser necesario que el ordenador esté conectado al drone, al router y al Internet, existe una alternativa, donde el router puede también estar conectado al Internet, que remueve una de las conexiones en la computadora.

4.5. Síntesis

La definición del alcance, requisitos funcionales, no funcionales o de rendimiento permite detallar la solución de este sistema de localización, que dan lugar al diseño conceptual mediante la arquitectura del sistema. Esta arquitectura presenta una conceptualización general que se divide en el sistema de localización y sistema de manejo UAV. A través de los módulos que contiene cada uno de ellos y a su integración da lugar a determinar los 5 factores que expone la optimización la estimación de localización como prueba de fiabilidad. Por tanto, esta arquitectura responde a las necesidades de los requisitos expuestos.

Esta arquitectura da lugar a la implementación del sistema que ha sido dividido en el sistema UAV conocido como módulo de vuelo, indispensable por ser el objetivo de posicionamiento en estado estático y dinámico que emite parámetros para la correspondiente estimación. Posteriormente da lugar al sistema de localización que cuenta con dos tipos de módulos: (i) envío y recepción de señales, y (ii) posicionamiento. La primera se divide en 2 partes más transmisor y receptor que da lugar a la integración del módulo de localización, a través de la modularidad de los componentes que da lugar a la segunda parte que define al módulo de posicionamiento es decir a la optimización del algoritmo AoA. Finalmente, para su punto central de control se desarrolla la interfaz gráfica que permite al usuario interactuar con el programa donde la parte hardware y software se pone en juego para la estimación de localización.

5. Análisis y Evaluación de Resultados

Este capítulo es parte de la fase de Investigación Ciencia del Diseño, que muestra la evaluación del sistema de localización en un ambiente interno y externo, pero de diferente magnitud y estado del drone. Se ha detallado este capítulo a través de una metodología de evaluación, evaluación del sistema de localización, señal medida y fotogrametría.

5.1. Metodología de Evaluación

La evaluación del sistema de localización para un mini vehículo autónomo se ha dividido en cuatro diferentes partes: (i) se realizó tres tipos de pruebas (estado: estático, dinámico lineal y multilineal) en un ambiente interno y externo, con dos magnitudes diferentes; (ii) evaluar la precisión del sistema mediante el cálculo del error relativo; (iii) se ejecutó una recolección de datos para comparar la potencia emitida por cada uno de los nodos; y (iv) mostrar mediante imágenes y modelos el sistema de fotogrametría. A continuación, se detalla las variables utilizadas para probar la optimización de los sistemas (ver Tabla 5.1 y Tabla 5.2).

Tabla 5.1. Definición conceptual de las variables evaluadas

Sistema de Localización	
Variable	Definición conceptual
Angulo	Ángulo que se forma a partir de la dirección de la intensidad de la señal y la dirección de referencia.
Potencia	Potencia máxima emitida por cada uno de los nodos sensores.
Error Estimado	Distancia entre los vectores práctico y real.
Error de precisión GPS	Distancia entre los vectores GPS y práctico.
Sistema UAV-Fotogrametría	
Variable	Definición conceptual
Modelo 3D	Creación de un modelo en tres dimensiones con base a una imagen en 2D.
Manejo drone	Control del estado del drone: estático y dinámico.

Tabla 5.2. Definición operacional de las variables evaluadas

Sistema de Localización				
Variable	Definición operacional		Indicador	Herramienta
Potencia	maxRSSI	Potencia máxima	dBm	Arduino ESP-12E
Ángulo	hAngle	Angulo donde se encontró la potencia máxima	Grados °	Arduino ESP-12E
Estimación	(P_x, P_y)	Coordenadas que se obtiene del AoA	Metros (m)	Netbeans
Error Estimado	$d_E(P_x, P_y)$	Distancia euclíadiana	Metros (m)	Excel
Error de precisión GPS	$d_{EGPS}(P_x, P_y)$	Distancia euclíadiana	Metros (m)	Excel
Sistema UAV-Fotogrametría				
Variable	Definición operacional		Indicador	Herramienta
Modelo 3D	n imágenes	Imágenes tomadas de forma automática en cada waypoint		Autodesk
Manejo drone	Comandos	Comando para movilizarnos		Netbeans

Para captar las medidas que generan el error de precisión se utilizó herramientas como ESP-12E, que emplearon como software al Arduino IDE y Netbeans, que son programas de software libre. Posteriormente para el error de precisión del sistema se utiliza una hoja de cálculos de Microsoft Excel. De la misma forma para el error de precisión GPS es necesario contar con un dispositivo móvil, con una aplicación que muestre los valores de la posición del drone en latitud y longitud, así mismo los diferentes cálculos son realizados en Excel.

Por otro lado, el manejo del drone utiliza Netbeans, para enviar los comandos que permiten redirigir por la ruta establecida. Finalmente se utiliza la herramienta Autodesk de software privado, que permite crear modelo en 3D.

5.2. Evaluación del Sistema de Localización y UAV

Para la evaluación tanto del sistema de localización como el sistema UAV se planteó 6 escenarios, tres internos y tres externos. Cada una representa el estado del drone: estático, dinámico lineal y multilineal con dimensiones del 5x5 y 10x10 metros respectivamente.

Para los distintos escenarios de prueba, el sistema de localización cuenta con tres nodos móviles que son ubicados en distintas magnitudes en el entorno real. En cada posición los nodos deben realizar un barrido con un grado a la vez comenzando en los 20° y terminando en los 160° , es decir que la antena tiene un barrido de 140° en total. Es necesario que el punto de detección mida los ángulos en el mismo referencial, es decir que el servomotor se coloque en la posición de 90° , lo que permita medir y definir en la aplicación el ángulo medido con el eje X positivo (ver Figura 5.1).

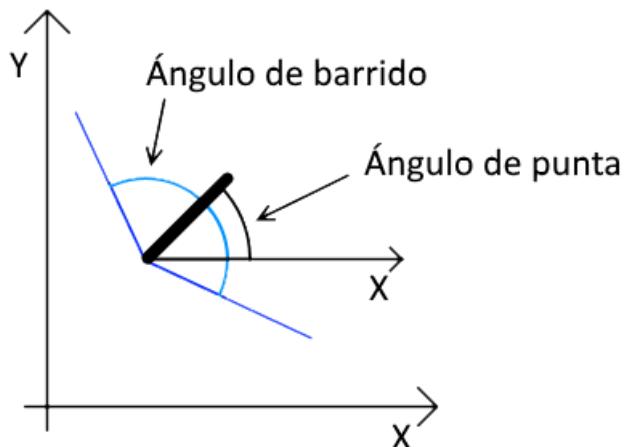


Figura 5.1. Proceso de adquisición del ángulo de punta

Una vez definido la posición, ángulo y altura de los nodos, se determina de la misma forma en la interfaz gráfica con una distancia similar al existente. De acuerdo con el estado del drone el usuario debe realizar ciertas acciones; por ejemplo, en estado estático el drone es colocado igual a la posición que haya sido colocado en el simulador; por tanto, las distancias coinciden en los dos ambientes, así se logró obtener medidas sin mayor error de distancia.

Por otro lado, se tiene el estado dinámico tanto lineal como multilineal, la cual precisan que los tres nodos capten la señal del drone y logren ubicar a este. De tal manera se encuentra la posición actual del UAV, la cual comienza a recibir los comandos que permite el vuelo de manera automática. Para estos escenarios el error se calcula en las posiciones inicial y final, esto se registra el momento exacto en el que el drone comienza a realizar el camino, así como

el momento en que llega. Los puntos que se calculan antes que el vehículo inicie el vuelo son usados, para medir la posición inicial y error, después de completar el destino se utiliza para medir la posición final y su respectivo error.

Durante la evaluación los tres nodos captan n estimaciones, que son mostradas a través de vectores calculados en metros.

Otro aspecto para tener en cuenta es el tiempo de evaluación implementado, que varía con respecto al estado del drone, es el caso del estado estático que es mayor es su tiempo el número de posiciones calculadas. Sin embargo, en el estado dinámico no se sabe cuánto tiempo es usado, ya que depende de la rapidez de detección del drone y su localización. A continuación, se describe las pruebas en ambiente interno y externo con sus diferentes escenarios.

5.2.1. Prueba en Ambiente Interno

Las evaluaciones realizadas en ambientes internos, fueron planteadas en tres escenarios de dos magnitudes diferentes, colocados tres nodos Wi-Fi en distintas distancias como se observa en el la Figura 5.2 y Figura 5.3.

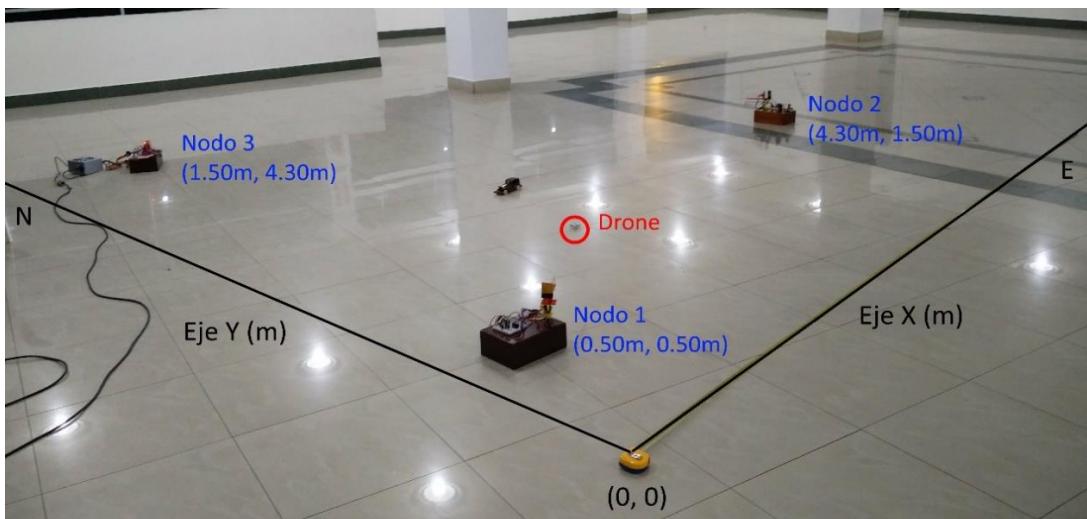


Figura 5.2. Escenario Ambiente Interno 5x5m

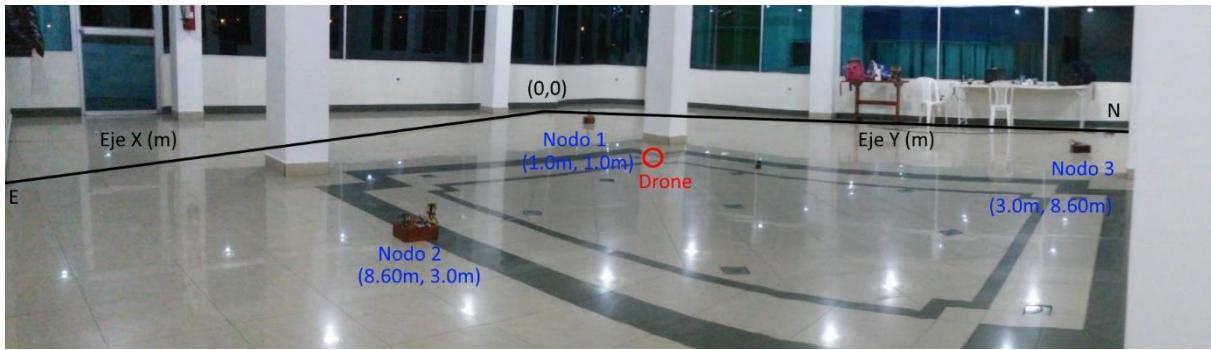


Figura 5.3. Escenario Ambiente Interno 10x10m

Este escenario cuenta con múltiples objetos que generan la pérdida de señal y causan la interferencia, debido a la estructura del edificio, que no da lugar a la eliminación de tales obstáculos en las evaluaciones que precisan de mayor espacio. Más adelante, se detalla los resultados obtenidos del escenario 5x5 y 10x10 metros, con cada uno de los estados del drone.

5.2.1.1. Escenarios 5x5m – 10x10m

Como se expuso anteriormente cada escenario contó con 3 pruebas, que corresponden a los estados del drone. Los diferentes valores obtenidos de cada uno de los casos, se muestra en el ANEXO A.1 y A.2. El anexo cuenta con las gráficas finales que representan la ruta del drone tanto estático y dinámico, con sus diferentes posiciones calculadas. Los puntos y líneas de color rojo, verde y azul representan las posiciones de las antenas y las direcciones que forman parte del RSS. También se tiene representados por puntos de color rosa y las líneas de color amarillo, las mismas que muestran la ruta definida para el UAV (ver Figura A.1.1 - Figura A.1.6).

Los vectores mostrados en las Tabla A.1.1 - Tabla A.1.6 son los valores emitidos por el programa en los escenarios 5x5m y 10x10m respectivamente. Estos datos permiten calcular el punto medio, y con ello la distancia Euclíadiana entre el punto medido y la posición real. A continuación, se muestra la Tabla 5.3 y Tabla 5.4 con los resultados de error calculados en ambos escenarios, donde se muestra que el error incrementa de acuerdo a la distancia de los nodos al drone, por tanto se verifica que en el escenario 10x10m en estado dinámico multilineal el error es mayor a los escenarios restantes, una razón a esto es el incremento de distancia de los nodos.

Tabla 5.3. Resultados Ambiente Interno-Escenario 5x5m

Estado	Posición inicial (m)	Posición inicial calculada (m)	Error E. inicial (m)	Posición final (m)	Posición final calculada (m)	Error E. final (m)
Estático	(1.47, 1.35)	(1.407, 1.321)	0.068	-	-	-

Dinámico	(1.48, 2.00)	(1.291, 1.927)	0.202	(2.39, 2.45)	(2.574, 2.628)	0.257
lineal						
Dinámico	(1.49, 1.25)	(1.337, 1.126)	0.196	(3.21, 2.68)	(3.293, 2.594)	0.119
Multilineal						

Tabla 5.4. Resultados Ambiente Interno-Escenario 10x10m

Estado	Posición inicial (m)	Posición inicial calculada (m)	Error E. inicial (m)	Posición final (m)	Posición final calculada (m)	Error E. final (m)
Estático	(2.61, 2.82)	(2.582, 2.721)	0.102	-	-	-
Dinámico	(3.25, 4.43)	(3.145, 4.201)	0.251	(6.00, 5.90)	(6.034, 6.042)	0.146
lineal						
Dinámico	(2.60, 2.90)	(2.891, 2.407)	0.571	(5.60, 5.75)	(5.853, 5.325)	0.494
Multilineal						

5.2.2. Prueba en Ambiente Externo

Las evaluaciones en ambientes externos fueron planteadas al aire libre, sin paredes ni obstáculos. Esto se puede ver la Figura 5.4 y Figura 5.5, que muestra el entorno de prueba utilizado, tanto del escenario 5x5m y 10x10m. En ambos escenarios se colocó los tres nodos Wi-Fi, con las mismas distancias implementadas en ambiente interno. Esta implementación permitió realizar una comparación de ambos ambientes, que dio lugar al análisis de este sistema.

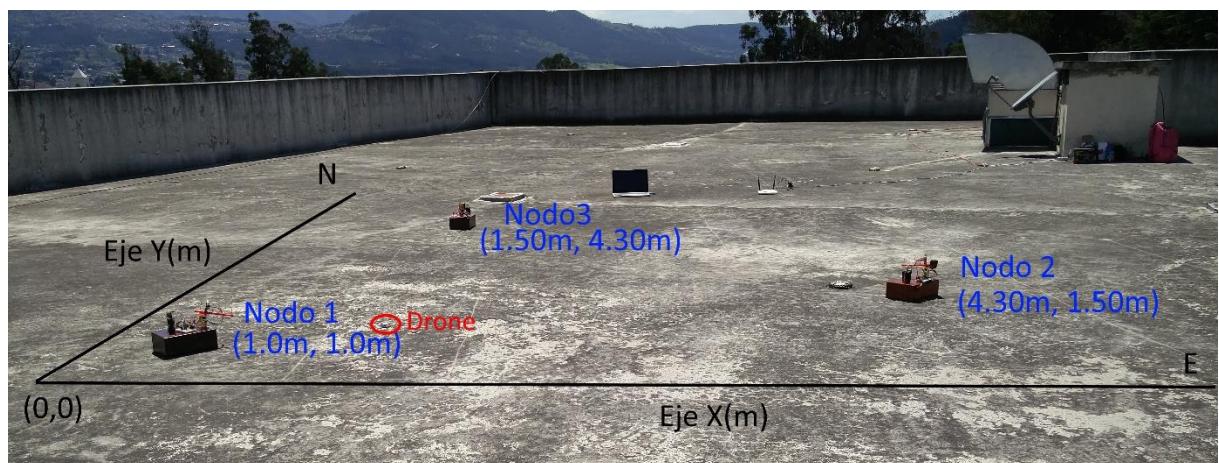


Figura 5.4. Escenario Ambiente Externo 5x5m

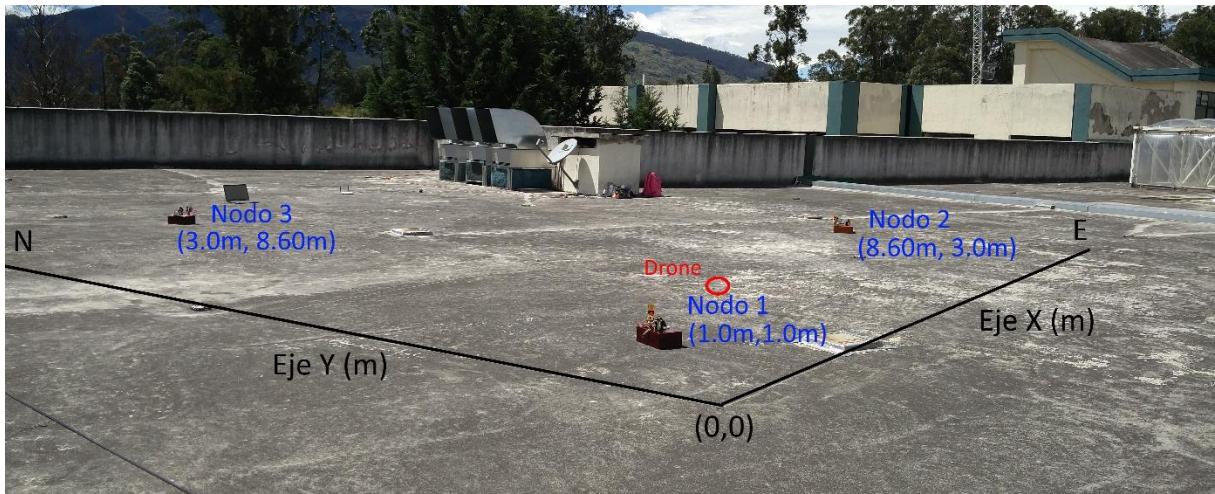


Figura 5.5. Escenario Ambiente Externo 10x10m

En ambos escenarios se buscó el norte geográfico que permitió precisar los ejes X y Y, que son convenientes para la posición de los tres nodos sensores. A continuación, se describe los resultados calculados de ambos escenarios de los tres estados del drone.

5.2.2.1. Escenarios 5x5m – 10x10m

La sección anterior define tres diferentes pruebas en dos escenarios de diferentes magnitudes, los valores obtenidos son presentados en el ANEXO A.2. Este anexo contiene las gráficas de la estimación de posición del drone en ambos escenarios (ver Figura A.2.1 - Figura A.2.6), a más de ello se muestra los valores de cada localización en forma de vectores (ver Tabla A.2.1 - Tabla A.2.6).

En la siguiente Tabla 5.5 y Tabla 5.6 se aprecia los resultados del punto medio y la distancia euclíadiana (error de posición) de cada escenario en los tres estados de drone, se verifica que en estos escenarios el error es menor con respecto a los escenarios internos. Esto se atribuye a la falta de obstáculos, ya que estos causan interferencias en la señal y el efecto multipath.

Tabla 5.5. Resultados Ambiente Externo-Escenario 5x5m

Estado	Posición inicial (m)	Posición inicial calculada (m)	Error E. inicial (m)	Posición final (m)	Posición final calculada (m)	Error E. final (m)
Estático	(1.32, 1.21)	(1.273, 1.205)	0.047	-	-	-
Dinámico lineal	(1.60, 1.67)	(1.508, 1.579)	0.129	(2.80, 2.00)	(2.711, 2.160)	0.182
Dinámico Multilineal	(1.25, 0.90)	(1.158, 0.878)	0.095	(2.90, 2.23)	(2.963, 2.262)	0.069

Tabla 5.6. Resultados Ambiente Externo-Escenario 10x10m

Estado	Posición inicial (m)	Posición inicial calculada (m)	Error E. inicial (m)	Posición final (m)	Posición final calculada (m)	Error E. final (m)
Estático	(2.51, 3.24)	(2.521, 3.161)	0.080	-	-	-
Dinámico lineal	(2.99, 3.71)	(2.986, 3.764)	0.054	(6.20, 5.00)	(5.895, 5.133)	0.332
Dinámico Multilineal	(3.25, 2.65)	(3.151, 2.598)	0.111	(6.25, 5.48)	(6.367, 5.376)	0.156

5.2.3. Criterios de Evaluación - Precisión

Para evaluar la precisión este sistema de localización, se compara dos distancias diferentes con respecto a la ubicación del drone, (i) entre el punto calculado y el real, (ii) entre las coordenadas captadas por otro software y el real. La primera longitud se refiere a los valores denominados como “*error*” que se encuentran presentes en la Tabla 5.3 a la Tabla 5.6. Por otro lado, la segunda distancia se describe a un valor tomado por una tecnología ya probada, en este caso se hace uso del GPS, presente en dispositivos móviles (smartphone), utilizado por diferentes aplicaciones, una de ellas es Latitud Longitud Coordenadas¹⁰, que muestra la ubicación actual gráfica y valorativamente (latitud y longitud). Esta aplicación es amigable con el usuario, cuenta con una localización inmediata, por tanto, brinda la información necesaria para la evaluación del sistema (ver Figura 5.6).

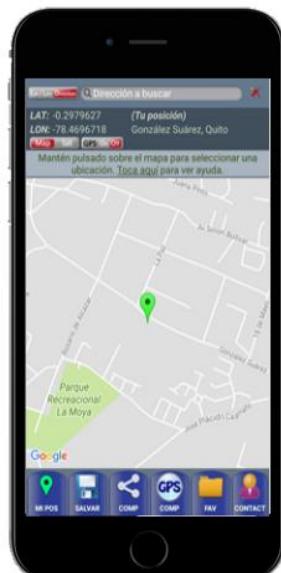


Figura 5.6. Latitud Longitud Coordenadas- Aplicación de localización inmediata

¹⁰ Latitud Longitud Coordenadas: Aplicación que localiza la ubicación actual, que comparte la dirección postal, latitud, longitud y una imagen del lugar. (Guipuzcoa, 2016)

Para el cálculo de la distancia antes mencionada es necesario conocer las coordenadas geográficas del punto inicial del plano cartesiano y la posición original del drone. Mediante estos dos datos es posible calcular las coordenadas cartesianas por medio de un algoritmo de compensación latitud/longitud, por cierta cantidad de metros de forma inversa (Exchange, 2010).

El algoritmo a utilizar precisa conocer datos previos, como el radio de la tierra $R = 6378137$ metros respecto al radio ecuatorial y obviamente las coordenadas geográficas antes mencionadas. Esto da como resultado las coordenadas cartesianas de la posición real captadas por el GPS. De la Tabla 5.7 a la Tabla 5.10, se muestran las coordenadas geográficas y cartesianas obtenidas por el GPS en las posiciones reales del drone, tanto en ambos ambientes como en los escenarios 5x5m y 10x10m. A más de estos datos, se expone el error calculado entre los datos reales y los del dispositivo.

Tabla 5.7. Error Ambiente Interno-Escenario 5x5m

Lat(origen): -0.29795 Long(origen): -78.4696032				
Estado	Posición	Coordenadas obtenidas	Coordenadas	Error P. GPS
	inicial (m)	GPS (Lat - Long)	Cartesianas GPS (m)	inicial (m)
Estático	(1.47, 1.35)	Latitud: -0.2979312 Longitud: -78.4696979	(2.107, 2.09)	0.98
Dinámico lineal	(1.48, 2.00)	Latitud: -0.2979205 Longitud: -78.4697035	(2.23, 3.28)	1.48
Dinámico	(1.49, 1.25)	Latitud: -0.2979287 Longitud: -78.4696842	(1.80, 2.37)	1.16
Multilineal				
Estado Final	Posición	Coordenadas obtenidas	Coordenadas	Error P. GPS
	final (m)	GPS (Lat - Long)	Cartesianas GPS (m)	final (m)
Dinámico lineal	(2.39, 2.45)	Latitud: -0.2979246 Longitud: -78.4696642	(1.36, 2.83)	1.10
Dinámico	(3.21, 2.68)	Latitud: -0.2979406 Longitud: -78.4697415	(3.07, 1.04)	1.63
Multilineal				

Tabla 5.8. Error Ambiente Interno-Escenario 10x10m

Lat(origen): -0.297981 Long(origen): -78.4698411				
Estado	Posición	Coordenadas obtenidas	Coordenadas	Error P. GPS
	inicial (m)	GPS (Lat - Long)	Cartesianas GPS (m)	inicial (m)
Estático	(2.61, 2.82)	Latitud: -0.2979537 Longitud: -78.4698887	(1.06, 3.04)	1.56

Dinámico lineal	(3.25, 4.43)	Latitud: -0.2979352 Longitud: -78.4699491	(2.40, 5.10)	1.07
Dinámico	(2.60, 2.90)	Latitud: -0.2979474 Longitud: -78.4699793	(3.08, 3.74)	0.96
Multilineal				
Estado Final	Posición final (m)	Coordenadas obtenidas GPS (Lat - Long)	Coordenadas Cartesianas GPS (m)	Error P. GPS final (m)
Dinámico lineal	(6.00, 5.90)	Latitud: -0.2979237 Longitud: -78.4701459	(6.78, 6.37)	0.92
Dinámico	(5.60, 5.75)	Latitud: -0.2979254 Longitud: -78.4701385	(6.62, 6.19)	1.11
Multilineal				

Tabla 5.9. Error Ambiente Externo-Escenario 5x5m

Lat(origen): -0.3130349 Long(origen): -78.445614

Estado	Posición inicial (m)	Coordenadas obtenidas GPS (Lat - Long)	Coordenadas Cartesianas GPS (m)	Error P. GPS inicial (m)
Estático	(1.32, 1.21)	Latitud: -0.3130199 Longitud: -78.4456515	(0.83, 1.67)	0.66
Dinámico lineal	(1.60, 1.67)	Latitud: -0.3130225 Longitud: -78.4456724	(1.30, 1.38)	0.42
Dinámico	(1.25, 0.90)	Latitud: -0.3130261 Longitud: -78.4455914	(1.73, 0.98)	0.48
Multilineal				
Estado Final	Posición final (m)	Coordenadas obtenidas GPS (Lat - Long)	Coordenadas Cartesianas GPS (m)	Error P. GPS final (m)
Dinámico lineal	(2.80, 2.00)	Latitud: -0.3130197 Longitud: -78.4457512	(3.05, 1.69)	0.40
Dinámico	(2.90, 2.23)	Latitud: -0.3130128 Longitud: -78.4457294	(2.57, 2.46)	0.39
Multilineal				

Tabla 5.10. Error Ambiente Externo-Escenario 10x10m

Lat(origen): -0.3130318 Long(origen): -78.4456036

Estado	Posición inicial (m)	Coordenadas obtenidas GPS (Lat - Long)	Coordenadas Cartesianas GPS (m)	Error P. GPS inicial (m)
Estático	(2.51, 3.24)	Latitud: -0.3130068 Longitud: -78.4456996	(2.14, 2.78)	0.58
Dinámico lineal	(2.99, 3.71)	Latitud: -0.3130022 Longitud: -78.4457211	(2.62, 3.29)	0.56
Dinámico	(3.25, 2.65)	Latitud: -0.3130145 Longitud: -78.4457476	(3.21, 1.92)	0.72
Multilineal				
Estado Final	Posición final (m)	Coordenadas obtenidas GPS (Lat - Long)	Coordenadas Cartesianas GPS (m)	Error P. GPS final (m)

Dinámico lineal	(6.20, 5.00)	Latitud: -0.3129808 Longitud: -78.4458916	(6.42, 5.67)	0.72
Dinámico	(6.25, 5.48)	Latitud: -0.3129853 Longitud: -78.4459116	(6.86, 5.17)	0.68
Multilineal				

Con los resultados presentados anteriormente, se demuestra que tan preciso es el sistema de localización, comparando los errores calculados de la Tabla 5.3 a la Tabla 5.6, que corresponden a los valores del sistema, y los errores del GPS (ver Tabla 5.7 a la Tabla 5.10). Se observa que las distancias que corresponden al sistema tienen un valor menor a las captadas por el GPS, un ejemplo de comparación de los errores de ambos programas son los datos en ambiente interno en un escenario del 5x5m:

0.068m → Sistema de Localización (Estado estático)

0.98 m → Tecnología GPS (Estado estático)

Como se observa la distancia mayor corresponde a la tecnología GPS, como ya se conoce el GPS puede contar con varios problemas de precisión, en el caso del ambiente interno pudo afectar el mismo hecho de localizar un punto dentro de un edificio que se encuentra sin límite de visión o también el reflejo de la señal ante las paredes y los obstáculos del entorno evaluado, por tal motivo la señal es receptada con un grado de error elevado. La misma conclusión puede ser observada en ambientes externos, un ejemplo de comparación en escenario del 10x10m es:

0.080m → Sistema de Localización (Estado estático)

0.58 m → Tecnología GPS (Estado estático)

Donde los valores del GPS son mayores a los del sistema, por el hecho encontrar interferencias que produzcan ruido o sombra que logran el retraso o el efecto multirayectoria.

Otro caso de comparación se presenta en los valores obtenidos en los ambientes tanto internos como externos por medio del GPS, que los datos calculados en entornos abiertos tienden a un error menor a los internos, por el hecho de encontrarse en un espacio sin obstáculos que ocasionen la pérdida de la señal.

Con estos datos comparados se concreta que la tecnología GPS cuenta con una precisión del 2.5m con un nivel de confianza del 50%, es decir que en un círculo de 2.5m tal vez puede encontrarse la posición correcta (Pozo-Ruz, 2000). Por tanto, se puede definir que el GPS es una tecnología utilizada en el mercado por estar presente en diferentes dispositivos ubicuos,

pero no cuenta con la precisión que el usuario necesita cuando es necesario ubicar un dispositivo pequeño en estado estático y dinámico, esto lleva a la conclusión que el presente sistema de localización si cuenta con la precisión que exige el objetivo de este proyecto.

5.2.4. Análisis Ambiente Interno y Externo

A continuación, los resultados obtenidos se analizan y comparan de diferentes formas:

Ambiente Interno

- De acuerdo con los datos capturados del ambiente interno en el escenario 5x5m y 10x10m (ver Tabla 5.3 y Tabla 5.4), se observa el error máximo entre ellos que es:

$$6.8\text{cm} \rightarrow 5\times 5\text{m}$$

$$57\text{cm} \rightarrow 10\times 10\text{m}$$

El resultado con mayor precisión fue del entorno 5x5m. Esta comparación se realizó sin tomar en cuenta el estado en que se encontró el drone, que permitió deducir que a mayor distancia incrementa su error de posicionamiento.

- Se observa que el estado estático del drone de ambos escenarios cuenten con una precisión del:

$$6.8\text{cm} \rightarrow 5\times 5\text{m}$$

$$10\text{cm} \rightarrow 10\times 10\text{m}$$

Al observar los valores de estado dinámico tanto lineal como multilineal de ambos escenarios cuentan con una distancia mayor a las antes mencionadas. Esto resultó llevó a la conclusión que el sistema de control de vuelo es inestable e impreciso, de acuerdo con los datos de error obtenidos con respecto a las rutas que contienen múltiples waypoints. La razón a esto se puede encontrar en los equipos utilizados, específicamente en los servomotores que cuentan con una débil precisión de rotación, tal vez el uso de *stepper motors*, logre realizar un constante movimiento.

- En el estado dinámico, tanto lineal como multilineal de ambos escenarios se pudo observar que, en la posición inicial con un error de posicionamiento, menor es el escenario de 5x5m. De la misma forma en la posición final se realizó una comparación entre ellas, sin embargo, en la posición final del dinámico lineal del 5x5m es mayor con respecto al 10x10m. Esta variación puede ser al no alcanzar la posición final y al no ser

apagado por una distancia considerable cuando se compara con la posición deseada. No obstante, esto no afecta de ningún modo al sistema de localización.

- Al analizar ambos estados dinámicos no se pudo asegurar cuál de ellos tiene un mayor error de posicionamiento en toda la ruta establecida; sin embargo, al visualizar las gráficas se pudo apreciar la detección de la potencia máxima a través de la ruta que se marca, es decir que solamente visualmente se pudo saber si cumple el camino trazado por el usuario.

Ambiente Externo

- En el ambiente externo se capturó la misma cantidad de datos, como en el ambiente interno, a más de ello se realizó similares comparaciones con la Tabla 5.5 y Tabla 5.6, un ejemplo es los errores máximos en cada uno de los escenarios:

$$4.7\text{cm} \rightarrow 5\times 5\text{m}$$

$$33\text{cm} \rightarrow 10\times 10\text{m}$$

Estas distancias muestran que el error de posición con mayor precisión es del entorno $5\times 5\text{m}$, por tanto, se deduce que en espacios con menor distancia se reduce su error. Este último se debe al hecho de que los servomotores cuentan con posiciones fijas en pasos de un grado. Cuanta mayor sea su distancia, mayor es el error que este presenta en las mediciones del RSS.

- Al comparar los estados en estado estático de los dos escenarios,

$$4.7\text{cm} \rightarrow 5\times 5\text{m}$$

$$8\text{cm} \rightarrow 10\times 10\text{m}$$

se deduce que, en ambientes de menor distancia, no existe mayor error de posicionamiento, esto se debe a la reducción del área de posicionamiento y al gran número de potencias máximas captadas por las antenas que da lugar a la optimización del cálculo del punto medio, es decir a mayor número de pruebas reduce su área de posicionamiento.

Ambiente Interno y Externo -Escenario 5x5m

Al comparar la Tabla 5.3 y Tabla 5.5 se pudo realizar un análisis de error de posicionamiento con cada uno de los estados del drone:

- **Estado estático:** Dichas tablas muestran un menor valor de error de posicionamiento en ambiente externo, esto se debe a la reducción de obstáculos que presenta el escenario, y de este modo se reduce el efecto multirayectoria que prácticamente es casi nulo y es un efecto de pérdida de señal.
- **Estado dinámico lineal - multilineal:** En ambos estados, tanto en el punto de inicio como el final de vuelo, se observó una disminución de error de posicionamiento en ambientes externos, por tanto, se concluye que en este tipo de escenarios la disminución del error de posicionamiento depende de la disminución de obstáculos que dan lugar a la perdida de la misma o la suma de otras señales.

Ambiente Interno y Externo -Escenario 10x10m

A partir de los datos obtenidos que presentan la Tabla 5.4 y Tabla 5.6, se deduce que:

- **Estado estático:** Al igual que el escenario 5x5m, este refleja un valor menor en ambientes externos, por el mismo hecho de no existir ningún tipo de obstáculos que obstruya el viaje de trayectoria de la señal. Por tal motivo su posicionamiento tiene mejor precisión.
- **Estado dinámico lineal y multilineal 10x10:** En la comparación de resultados de ambos estados de los dos escenarios, se define que los resultados obtenidos en ambiente externos presentan un error de posicionamiento casi nulo; por lo que se puede mencionar que los resultados en ambiente externos de diferentes medidas, su error de posicionamiento será menor por la falta de obstáculos que existen alrededor del entorno, lo que evita que sufra un desgaste de la comunicación.

5.3. Evaluación de la Señal Medida

Para la evaluación de la intensidad de la señal fue necesario, poner a prueba la antena Yagi que se encuentra presente en el prototipo del nodo sensor. Una vez puesto en uso el sistema de localización, los módulos ESP8266-12E captan este valor y lo presentan en la interfaz de soluciones. El RSSI adquirido por los nodos pueden ser comparados con otro tipo de software

o aplicación que capte estos valores, que pueden ser implementados en un dispositivo celular que cuente con el programa PingTools¹¹ o Wifi Analyzer¹². Este último es amigable con el usuario, que cuenta con una vista apta para la detección de estos datos (ver Figura 5.7).

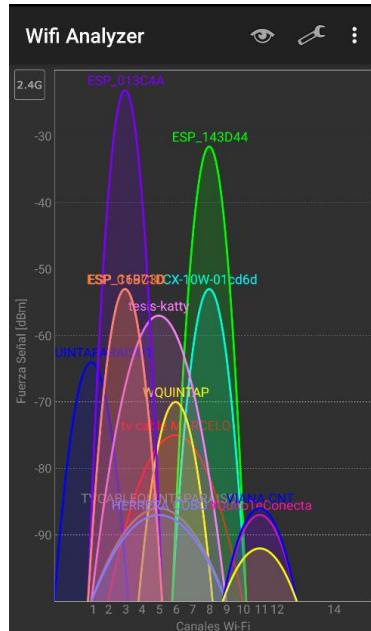


Figura 5.7. Wifi Analyzer -programa que detecta la fuerza de señal

Este programa detecta todas las redes existentes en el entorno, con su correspondiente fuerza de señal y canales de uso. Como se observa en la imagen anterior se detecta la red del drone “CX-10W-01cd6d”. Por tanto, para una captura de tiempo real será necesario contar con tres smartphones ubicados en cada nodo sensor, y a más de ello tener ayuda de otros usuarios, esto captó con mayor eficacia los datos. A continuación, se describe las pruebas realizadas en ambientes externos e internos.

5.3.1. Prueba en Ambiente Interno y Externo

Para la presente evaluación se utilizó los datos captados en ambientes diferentes uno interno y otro externo, ambos con 3 pruebas que corresponde al estado del drone (estático, dinámico lineal y multilineal), que se ponen a prueba en dos escenarios de dos magnitudes distintas (5x5m y 10x10m).

Para las distintas pruebas, es necesario que los tres nodos se encuentren distribuidos en distintas distancias como se observa en la Figura 5.8 (a-b), donde se muestra la posición de cada uno,

¹¹ PingTools: Aplicación gratuita que permite realizar el escaneo de red. (PingTools, 2015)

¹² Wifi Analyzer: Es un analizador Wifi que muestra los canales que lo rodean(Farproc, 2017)

con el ángulo que apunta cada antena Yagi que direcciona a la posición del drone. A más de ello como se indicó anteriormente, se colocó un smartphone para la captura de los datos que permitieron la comparación.

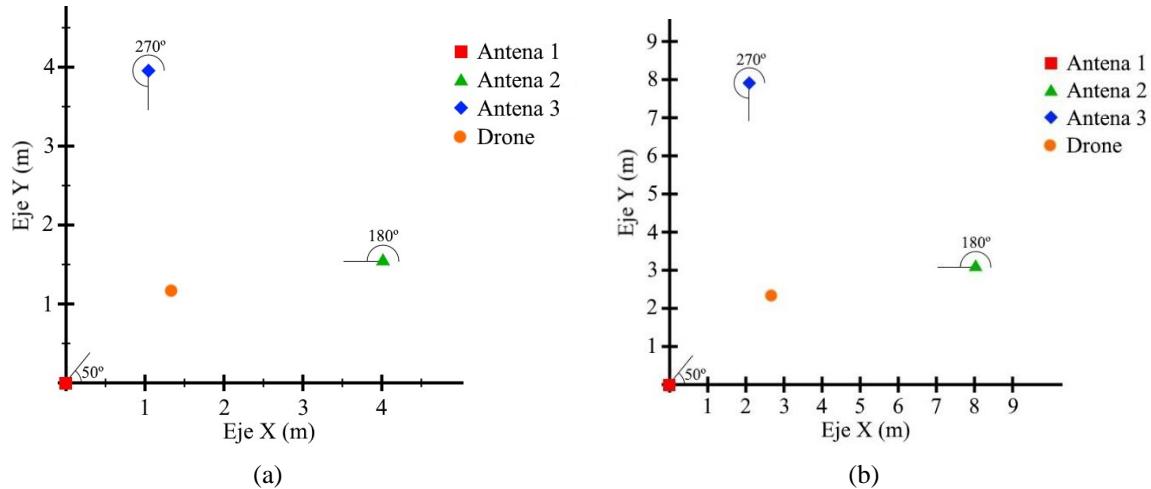


Figura 5.8. (a) Ambiente Interno y Externo 5x5m. (b) Ambiente Interno y Externo 10x10m

Los resultados obtenidos de cada uno de los casos se muestran en el ANEXO A.3, que se encuentran divididos en ambientes internos y externos, en escenarios de 5x5m y 10x10m, donde cada uno cuenta con tres estados. Los estados dinámicos cuentan con los valores del punto de comienzo y final del manejo del drone.

Por tanto, los datos obtenidos en el escenario 5x5m en los tres estados se muestra en las Tablas A.3.1 – Tabla A.3.3, que son valores emitidos en ambientes internos y externos, a más de ello se presentan las diferentes gráficas radiales (ver Figura A.3.1 - Figura A.3.5), que permiten comparar las tres mediciones en distintas escalas que permite visualizar entre el estado actual y el estado ideal de la señal.

Finalmente se muestra los resultados del escenario 10x10m en gráficas radiales (ver Figura A.3.6 - Figura A.3.10), que permite comparar las distintas mediciones como la señal de prueba y la real, a más de ello se presenta los distintos valores usados para dichas gráficas en la Tabla A.3.4 - Tabla A.3.6. A continuación, se realiza el análisis correspondiente de cada uno de los gráficos comparativos obtenidos.

5.3.1.1. Análisis de respuestas- Intensidad de señal

De acuerdo con los resultados obtenidos, cada tabla contiene la intensidad de la señal máxima de cada uno de los nodos en los tres estados diferentes.

Escenario 5x5m

- **Estado estático:** de acuerdo con las señales recibidas en ambientes internos solo el tercer nodo recepta una mejor señal; sin embargo, en ambiente externo dos de estas antenas captan de manera óptima la señal. Puede deducirse que en ambiente externo la antena Yagi es una solución favorable para el posicionamiento de objetos.
- **Estado dinámico lineal:** La mejor señal receptada utilizando la antena Yagi es en ambiente externo, donde tanto el punto inicial como el final, muestra que el aumento de una antena externa es la solución al sistema de localización.
- **Estado dinámico multilineal:** Tanto en ambientes internos como externos, en el punto inicial y final del vuelo se observa que el uso de antena Yagi, el receptor recibe una señal de mayor potencia, por tanto, se define que esta solución es óptima para el posicionamiento de dispositivos en movimiento multilineal.

Escenario 10x10m

En las Tabla A.3.4, Tabla A.3.5 y Tabla A.3.6 muestra que tanto en ambiente internos como externos en los tres estados del drone al usar la antena Yagi, el receptor capta la mejor señal emitida por el drone, por tanto, el prototipo implementado para este sistema es la solución perfecta para la estimación de posición.

5.4. Evaluación del Sistema de Fotogrametría

Para la validación del sistema de fotogrametría, se evaluaron múltiples soluciones de software como MeshLab, 3DF Zephyr Pro, 3DSOM, 123D Catch y Autodesk ReMake. Este último fue el programa seleccionado debido a los resultados aceptables que brindó mediante el espacio de pruebas. El proceso de generación del modelo 3D tarda de 5 a 7 minutos, este valor depende de la velocidad de conexión a Internet, ya que estas imágenes deben cargarse al servidor.

Para obtener un modelo 3D en mejores condiciones es necesario un gran número de imágenes, por este motivo es de gran importancia definir una gran cantidad de waypoints que marquen la ruta del vehículo, ya que estos son los puntos donde se tomó las diferentes fotos. Sin embargo, en trabajos a futuro se espera la optimización del vuelo del drone en cuanto a la rotación hacia el objeto sobrevolado.

La Figura 5.9 (a) muestra el objeto sobrevolado a través de imágenes que fueron tomadas de manera automática, mientras que la Figura 5.9 (b) presenta el resultado que pudo ser obtenido

a través del software, una vez que al sistema de control optimice la rotación perfecta que necesita el drone.



Figura 5.9. (a) Imagen del drone autónoma. (b) Modelo 3D del objeto presente en la imagen.

El problema con las imágenes presentadas anteriormente es la falta de información sobre el tamaño y escala del objeto sobrevolado, la limitación de esta solución es por el entorno que rodea al modelo que son generados sin ser definidos correctamente.

5.5. Síntesis

Este capítulo cuenta con un conjunto de evaluaciones en dos ambientes diferentes uno interno y otro externo, cada uno con dos distancias diferentes de 5x5m y 10x10m, con tres pruebas pertenecientes a los estados del drone (estático, dinámico lineal y multilineal).

Los resultados obtenidos en el sistema de localización y de vuelo dan como conclusión que tanto en ambientes internos como externos el error de posicionamiento se disminuye, sin embargo, al comparar ambos datos de los escenarios el entorno externo tiende a mejorar la localización de un objeto por el hecho de no contar con obstáculos que disminuyan la señal.

La segunda etapa de evaluaciones se relaciona a la precisión de posicionamiento, para tales pruebas fue necesario la recolección de coordenadas geográficas obtenidas por otro tipo de tecnología en localización. En este caso se comparó los resultados correspondientes al error de posicionamiento obtenido por el sistema y error de posicionamiento captado por la tecnología GPS, esta comparación demostró que el presente sistema cuenta con mayor precisión con respecto a la tecnología ya existente.

A más de las pruebas anteriores, se analiza la captura de la intensidad de señal, donde los valores obtenidos demuestra que la implementación de una antena Yagi, mejoran dicha captación; por tanto, el prototipo es una solución evidente para la localización de objetos en estado estático y dinámico. Finalmente, el sistema de fotogrametría es un estudio a futuro de la rotación del drone, al necesitar de un número mayor de fotografías que enfoquen el objeto sobrevolado; sin embargo, el sistema si cuenta con la facultad de tomar imágenes, pero no con tanta precisión para proyectar el objeto. No obstante, en la figura se muestra un claro ejemplo de la creación de un modelo 3D.

En el próximo capítulo se expone las conclusiones del trabajo desarrollado de acuerdo con los resultados obtenidos, a más de ello se enumera las diferentes recomendaciones de configuración para el diseño e implementación del sistema. Finalmente se realiza un análisis de las configuraciones a futuro que pueden ser ejecutados a partir del presente proyecto.

6. Conclusiones y Trabajo Futuro

6.1. Conclusiones

- Este proyecto se orientó al diseño e implementación de un sistema de posicionamiento 2D a través de objetos inteligentes, con lo que se disminuyó el error de posicionamiento, y con ello se optimizó la estimación de posicionamiento en ambientes externos e internos, para dispositivos móviles en estados estáticos y dinámicos con movimiento autónoma en tiempo real.
- Se analizaron los diferentes sistemas y tecnologías de localización, que determinaron la rapidez del cálculo, procesamiento, coste de hardware y software, utilizado en cada uno de los ejemplos académicos y comerciales. Esto permitió definir las características y tecnologías necesarias para el diseño del prototipo del sistema de localización, con mínimo error de posicionamiento, coste computacional y económico.
- Se definió una técnica experimental basado en el método de localización AoA, que optimiza el posicionamiento de un UAV, minimizando el error mediante la reducción del área de estimación de posicionamiento de un dispositivo móvil que cuenta con la tecnología Wi-Fi.
- Una aplicación del sistema implementado es la recolección imágenes de la ruta sobrevolada, a través del mini drone en cada uno de los waypoints ubicados en la interfaz de usuario, cuyo fin posterior es modelar un objeto en 3D con las imágenes capturas en el sobrevuelo.
- Se desarrolló una interfaz amigable con el usuario, que permite mostrar un mapa geográfico de la ruta marcada por el usuario, proveyendo de interacción usuario-sistema.
- Se realizaron pruebas de funcionalidad que permitieron validar el error de posicionamiento del sistema de localización, tanto en ambiente interno como externo, presentando resultados alentadores en su precisión para los casos analizados, donde se

evidencia que el sistema de localización por Wi-Fi puede ser hasta 10 veces más preciso que el GPS convencional.

6.2. Trabajo Futuro

- Para reforzar el diseño de este sistema se planea movilizar el drone en el plano X, Y y Z, y con ello controlar que la estabilidad del vehículo sea constante. A esto se suma la rotación en 360° que dará lugar a la visibilidad y movilidad, se considera la implementación de diferentes métodos, técnicas y herramientas que controlen la movilidad del UAV.
- La ejecución del vuelo en los planos X, Y y Z, dará camino a la evaluación en distancias mayores a 10m, es decir que tanto el sistema de localización como el de vuelo pueden ser puestas a prueba en entornos de gran distancia y así sobrevolar objetos de gran magnitud en ancho y altura.
- La implementación de un escáner laser 3D en el vehículo aéreo, permitirá suprimir el uso de servidores externos que generan el modelo 3D. Por tanto, el incremento de este dispositivo será una solución de navegación tridimensional en tiempo real sin mayor información previa del ambiente de prueba.

Bibliografía

- Abowd, G., & Mynatt, E. (2000). Charting past, present, and future research in ubiquitous computing. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 7(1), 29-58.
- Ahson, S., & Ilyas, M. (2010). *Location-based services handbook: Applications, technologies, and security*. . CRC Press.
- Alarifi, A., Al-Salman, A., Alsaleh, M., Alnafessah, A., Al-Hadhrami, S., Al-Ammar, M. A., & Al-Khalifa, H. S. (2016). Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances. *Sensors*, 707.
- Aman, M. S., Jiang, H., Quint, C., Yelamarthi, K., & Abdelgawad, A. (2016). Reliability evaluation of iBeacon for micro-localization. *Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*, 1-5.
- Andrade, R. A., Salas, P. H., & Paredes, D. S. (2008). TECNOLOGÍA Wi-Fi. . *Publicaciones sobre nuevas tecnologías*.
- Android. (s.d.). *Root: Por qué rootear tu teléfono móvil?* Obtido de Root: <https://androidayuda.com/root-por-que-rootear-tu-telefono-movil/>
- Arzayús. (2007). *Electromagnetismo*. Obtido de http://astroverada.com/_/Main/T_em.html
- Asadpour, M., Van den Bergh, B., Giustiniano, D., Hummel, K., Pollin, S., & Plattner, B. (2014). Micro aerial vehicle networks: An experimental analysis of challenges and opportunities. *IEEE Communications Magazine*, 52(7), 141-149.

Ash, J., & Potter, L. (2004). Sensor network localization via received signal strength measurements with directional antennas. . *Conference on Communication, Control, and Computing* , 1861-1870.

Autodesk. (2015). Autodesk®Remake. Obtido de Autodesk RemaKe: <https://remake.autodesk.com/about>

Axel, K. (2005). *Location-based services: fundamentals and operation*. John Wiley & Sons.

Bahl, P., & Padmanabhan, V. N. (2000). RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system. *IEEE Computer and Communications Societies*, 2, 775-784.

Bailey, T., Nieto, J., Guivant, J., Stevens, M., & Nebot, E. (2006). Consistency of the EKF-SLAM algorithm. . *Intelligent Robots and Systems*, 3562-3568.

Bello, O., & Zeadally, S. (2016). Intelligent device-to-device communication in the internet of things. *IEEE Systems Journal*, 10(3), 1172-1182.

Bensky, A. (2016). *Wireless positioning technologies and applications*. Artech House.

Braude, E. J., & Bernstein, M. E. (2016). *Software engineering: modern approaches*. Waveland Press.

Brchan, J. L., Zhao, L., Wu, J., Williams, R. E., & Pérez, L. C. (2012). A real-time RFID localization experiment using propagation models. *RFID*, 141-148.

Callaerts, D., Deforche, K., & Dumon, W. (28 de Marzo de 2017). *BlooLoc*. Obtido de <https://www.blooloc.com/about-us/meet-us>

Casas, R., Cuartielles, D., Marco, A., Gracia, H. J., & Falco, J. L. (2007). Hidden issues in deploying an indoor location system. *IEEE Pervasive Computing*, 6(2), 62-69.

Chan, Y. T., Chan, F., Read, W., Jackson, B. R., & Lee, B. H. (2014). Hybrid localization of an emitter by combining angle-of-arrival and received signal strength measurements. *Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 1-5.

Comercio, E. (11 de Octubre de 2016). *Los latinoamericanos temen más a los terremotos y a los tsunamis*. Obtido de El Comercio: <http://www.elcomercio.com/video/america-latina-terremotos-tsunamis-desastres.html>.

Dentamaro, V., Colucci, D., & Giangiuseppe, T. (2017). *Nextome: Indoor Positioning and Navigation System*. Obtido de <https://www.nextome.net/>

Drone Flyers. (15 de Junio de 2017). Obtido de Cheerson Cx-10w Mini FPV Quadcopter: <https://droneflyers.wordpress.com/cheerson-cx-10w-mini-fpv-quadcopter/>

Dubey, A. (2014). Global Positiong System. . *Springer International Publishing*, 215-230.

Edwards, A., Mahgoub, I., & Rathod, M. (2016). Investigation of RFID based localization for SmartDrive vehicular network testbed. *Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*, 1-6.

Exchange, S. (27 de Octubre de 2010). *Geographic Information Systems*. Obtido de Algorithm for offsetting a latitud/longitude by some amouny of meters: <https://gis.stackexchange.com/questions/2951/algorithm-for-offsetting-a-latitude-longitude-by-some-amount-of-meters>

Farid, Z., Nordin, R., & Ismail, M. (2013). Recent advances in wireless indoor localization techniques and system. *Journal of Computer Networks and Communications*.

Farproc. (5 de Febrero de 2017). *Wifi Analyzer*. Obtido de Google Play: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.farproc.wifi.analyzer&hl=es_419

Ferrando, M., & Valero, A. (2007). Fundamentos de radiación. *Antenas*.

Ferreira, M., Bagarić, J., Lanza-Gutierrez, J. M., Priem-Mendes, S., Pereira, J. S., & Gomez-Pulido, J. A. (2015). On the use of perfect sequences and genetic algorithms for estimating the indoor location of wireless sensors. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(4).

Fingerprints. (25 de Mayo de 2017). *Fingerprints Software*. Obtido de <http://www.fingerprintsoft.co/about.html>

Flyer, A. (11 de Marzo de 2016). *Primer Quadcopter*. Obtido de Cheerson CX-10W review: <http://www.firstquadcopter.com/quadcopter-reviews/cheerson-cx-10w-review/>

Garg, V., & Jhamb, M. (2013). A Review of Wireless Sensor Network on Localization Techniques. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 4.

Gezici, S. (2008). A survey on wireless position estimation. *Wireless personal communications*. 44(3), 263-282.

GoogleDevelopers. (2017). *Google Maps API*. Obtido de Google Maps para cada plataforma: <https://developers.google.com/maps/>

Gu, Y., Lo, A., & Niemegeers, I. (2009). *A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks*. *IEEE Communications surveys & tutorials*, 11(1), 13-32.

Gu, Y., Zhou, M., Fu, S., & Wan, Y. (2015). Airborne WiFi networks through directional antennae: An experimental study. *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 1314-1319.

Guipuzcoa, U. (23 de Mayo de 2016). *Latitud Longitud Coordenadas*. Obtido de <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.placesapps.myplacesfree>

Gupta, L., Jain, R., & Vaszkun, G. (2016). Survey of important issues in UAV communication networks. . *IEEE Communications Surveys & Tutorials.*, 18(2), 1123-1152.

Gupta, V. (15 de Abril de 2016). *Serialize thoughts*. Obtido de Android Zygote: <https://serializethoughts.com/2016/04/15/android-zygote/>

Hernández, J. V. (2010). Redes inalámbricas de sensores: Una nueva arquitectura eficiente y robusta basada en jerarquía dinámica de grupos. *Universidad Politécnica de Valencia*.

Hevner, A. R. (2007). A three cycle view of design science research. *Scandinavian journal of information systems*, 19(2).

Hevner, A., March, S., Park, J., & Ram, S. (Marzo de 2004). Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, 26(1), 75-105.

- Holl, P. (23 de Mayo de 2017). *Business Insider*. Obtido de Business Insider: <http://www.sciencealert.com/scientists-have-found-a-way-to-photograph-people-through-walls-using-wifi>
- Huh, S., Shim, D. H., & Kim, J. (2013). Integrated navigation system using camera and gimbaled laser scanner for indoor and outdoor autonomous flight of UAVs. *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 3158-3163.
- Ibrahim, A., & Ibrahim, D. (2010). Real-time GPS based outdoor WiFi localization system with map display. *Advances in Engineering Software*, 41(9), 1080-1086.
- IEEE. (1993). Ingeniería de Software Estandar IEEE 830. . *IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications*.
- IndoorAtlas (Realizador). (2014). *Search with Blue Dot* [Filme].
- Ismail, M. B., Fathi, A., Boud, A., Nurdiana, W., & Ibrahim, W. (2008). Implementation of location determination in a wireless local area network (WLAN) environment. *Advanced Communication Technology*, 2, 894-899.
- Jalamkar, D., & Selvakumar, A. (2016). Use of Internet of Things in a Humanoid Robot – A Review. *Advances in Robotics & Automation*.
- Kaneda, N., Deal, W., Qian, Y., Wterhouse, R., & Itoh, T. (2002). A broadband planar quasi-Yagi antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 50, 1158-1160.
- Khosian, Y., & Nielsen, I. (2016). A system of UAV application in indoor environment. *Production & Manufacturing Research*, 4(1), 2-22.
- Kraus, K. (2007). *Photogrammetry: geometry from images and laser scans*. Walter de Gruyter.
- Krishnan, R. (1987). Selection Criteria for Servo Motor Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2, 270-275.
- Krumm, J. (2016). *Ubiquitous computing fundamentals*. CRC Press.

- Kuo, W. H., Chen, Y. S., Cheng, K. T., & Lu, T. W. (2016). Signal Strength Based Indoor and Outdoor Localization Scheme in Zigbee Sensor Networks. *IAENG International Journal of Computer Science*, 23(1).
- Kuo, W. H., Chen, Y. S., Jen, G. T., & Lu, T. W. (2010). An intelligent positioning approach: RSSI-based indoor and outdoor localization scheme in Zigbee networks. *Machine Learning and Cybernetics (ICMLC) IEEE*, 6, 2754-2759.
- Li, B., Quader, I. J., & Dempster, A. G. (2008). On outdoor positioning with Wi-Fi. *Positioning*, 1(13).
- Lin, T. N., & Lin, P. C. (2005). Performance comparison of indoor positioning techniques based on location fingerprinting in wireless networks. *Wireless Networks, Communications and Mobile Computing*, 2, 1569-1574.
- Liu, H. D., Banerjee, P., & Liu, J. (2007). Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1067-1080.
- Liu, Z., Chen, Y., Liu, B., Cao, C., & Fu, X. (2014). HAWK: an unmanned mini-helicopter-based aerial wireless kit for localization. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 13(2), 287-298.
- Loughner, E. A., & Oldham, J. C. (2017). Genuine or Reproduction: A Comparision of 3D Imaging Techniques. *Cedarville University-Symposium*.
- Loyez, C., Bocquet, M., Lethien, C., & Rolland, N. (2015). A distributed antenna system for indoor accurate WiFi localization. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, 1184-1187.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Boehm, J. (2014). *Close-range photogrammetry and 3D imaging*. Walter de Gruyter.
- Mainetti, L., Patrono, L., & Sergi, I. (2014). A survey on indoor positioning systems. *Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 111-120.
- Martínez, R. F., Meré, J. O., de Pisón Ascacíbar, F. J., Marcos, A. G., & Elías, F. A. (2009). *Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica*. Madrid, España: Universidad de La Rioja.

Matsumoto, Y. (9 de Noviembre de 2016). *Ruby*. Obtido de Ruby: <https://www.ruby-lang.org/es/>

Medina, C., Segura, J. C., & Holm, S. (2012). Feasibility of ultrasound positioning based on signal strength. *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 1-9.

Micropik. (2016). SG90 9g Micro Servo. Obtido de SG90 Datasheet: <http://www.micropik.com/PDF/SG90Servo.pdf>

Mokbel, M., Chow, C., & Aref, W. (2016). Location Data Management: a Tale of Two Systems and the “Next Destination”? *Proceedings of the VLDB Endowment*, 9(13), 1622-1622.

Newcome, L. R. (2004). *Unmanned aviation: a brief history of unmanned aerial vehicles*. AIAA.

Omega, E. L. (02 de Mayo de 2017). Obtido de Omega Engineering Limited: <http://es.omega.com/prodinfo/sensores-inalambricos-transmisores.html>

Ota, H. e. (2016). Application of 3D Printing for Smart Objects with Embedded Electronic Sensors and Systems . *Advanced Materials Technologies*.

Passafiume, M., Maddio, S., Lucarelli, M., & Cidronali, A. (2016). An enhanced triangulation algorithm for a distributed RSSI-DoA positioning system. *In Radar Conference (EuRAD)*, 185-188.

Patel, K., Patoliya, J., & Patel, H. (2015). Low Cost Home Automation with ESP8266 and Lightweight protocol MQTT. *Transactions on Engineering and Sciences*, 3.

Patel, V., & Patel, A. (2016). Localization algorithm techniques for sensor node in wireless sensor network. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3(4), 2395-0056.

Pavkovic, B., Berbakov, L., Vrane, S., & Milenkovic, M. (2014). Situation awareness and decision support tools for response phase of emergency management: a short survey. *Database and Expert Systems Applications (DEXA)*, 154-159.

Peffers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., & Chatterjee, S. (2007). A design science research methodology for information systems research. *Journal of management information systems*, 24(3), 45-77.

Pérez, J., Urdaneta, E., & Custodio, Á. (2014). Metodología para el diseño de una red de sensores inalámbrico. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 18(70).

Photonix. (20 de Marzo de 2012). *Thingiverse*. Obtido de Directional Yagi WLAN Antenna Extension for 2.4 GHz: <https://www.thingiverse.com/thing:19548>

PingTools. (2015). *PingTools*. Obtido de <https://pingtools.org/>

Popleteev, A., Osmani, V., & Mayora, O. (2012). Investigation of indoor localization with ambient FM radio stations. *Pervasive Computing and Communications (PerCom)*. IEEE, 171-179.

Pozo-Ruz, A. R.-A. (2000). Sistema de posicionamiento global (GPS): Descripción, análisis de errores, aplicaciones y futuro. *ETS Ingenieros de Telecomunicaciones*.

Pressman, R. (2005). *Ingeniería del Software: Un enfoque práctico*. España: McGrawHill.

Rahman, M. (2014). Enabling drone communications with WiMAX Technology. *Information, Intelligence, Systems and Applications*. IEEE, 323-328.

República, L. (8 de junio de 2016). *Riesgos: Ecuador es un país “multiamenazas” en desastres naturales*. Obtenido de La República: . Obtido de La República: <http://www.larepublica.ec/blog/sociedad/2016/06/08/secretaria-de-riesgos-ecuador-es-un-pais-multiamenazas-en-desastres-naturales/>

Rida, M. E., Liu, F., Jadi, Y., Algawhari, A. A., & Askourih, A. (2015). Indoor location position based on bluetooth signal strength. *Information Science and Control Engineering (ICISCE)*, 769-773.

RLXComponents. (04 de Junio de 2017). *ESP8266 Development Board ESP-12 (ER-DP8266ESP12)*. Obtido de <https://rlx.sk/en/wifi/3724-esp8266-development-board-esp-12-er-dp8266esp12.html>

Scribd. (2011). *Scribd*. Obtido de Diseño de antena yagi:
<https://es.scribd.com/document/342552994/diseno-de-antena-yagi-pdf>

Shirts, G. (28 de mayo de 2017). *Packet Capture*. Obtido de Google Play:
<https://play.google.com/store/apps/details?id=app.greyshirts.sslcapture&hl=en>)

Shrestha, A., Cater-Steel, A., & Toleman, M. (2014). How to communicate evaluation work in design science research? An exemplar case study. *ACIS*.

Simon, H. A. (1996). *The sciences of the artificial*. . MIT press.

Sommerville. (2005). *Ingeniería del Software*. . Madrid: Pearson Addison Wesley.

TeamDev. (30 de Octubre de 2016). *JxBrowser*. Obtido de JsBrowser:
<https://www.teamdev.com/jxbrowser>

Temes, J. B. (2001). Ondas electromagnéticas en comunicaciones. (100).

Thingiverse. (17 de Octubre de 2014). *Raspberry B+housing, camera housing and servo gimbal for camera*. Obtido de <https://www.thingiverse.com/thing:504196>

Thompson, S. (28 de Marzo de 2017). *IndoorAtlas*. Obtido de <http://www.indooratlas.com>

Tretyakov, V., & Surmann, H. (2008). Hardware Architecture of a Four-Rotor UAV for USAR/WSAR scenarios. *SIMPAR*, 3-4.

Turró, M. (2005). Evolución y tendencias en la interacción persona-ordenador. *El profesional de la Información*, 14(6), 414-422.

Valavanis, K. (2008). Advances in Unmanned Aerial Vehicles: State of the Art and the Road to Autonomy. *Springer Science & Business Media*, 33.

Van de Velde, S., Vermeiren, V., & Verheyen, K. (Agosto de 2015). *Pozyx: Accurate Positioning* . Obtido de <https://www.pozyx.io/>

Varshavsky, A., & Patel, S. (2009). Location in ubiquitous computing. . Em A. Varshavsky, & S. Patel, *Ubiquitous computing fundamentals* (pp. 285-320).

Villalba, A. (2015). *Aplicación de una red inalámbrica de sensores para detección de presencia y conteo*. España: Universidad de Sevilla.

Villaseñor, M. L., Galindo, M. G., & Jiménez, R. M. (2007). De sensores inalámbricos, mitigación de riesgos y sistemas autoorganizados. *ContactoS*(64), 25-31.

Vorst, P., Sommer, J., Hoene, C., Schneider, P., Weiss, C., Schairer, T., & Carle, G. (2008). Indoor positioning via three different RF technologies. *RFID Systems and Technologies (RFID SysTech)*, 1-10.

Wait, J. R. (2013). Electromagnetic Waves in Stratified Media: Revised Edition Including Supplemented Material. *Elsevier*, 3.

Wieringa, R. J. (2014). Design Science Methodology for Information Systems and Software Engineering. *Springer Berlin Heidelberg*, 225-245.

Wifarer. (27 de Marzo de 2017). *Wifarer*. Obtido de <http://www.wifarer.com/our-story.html>

Xiao, J., Liu, Z., Yang, Y., Liu, D., & Han, X. (2011). Comparison and analysis of indoor wireless positioning techniques. *Computer Science and Service System (CSSS)*, 293-296.

Xposed Module Repository. (19 de Junio de 2014). Obtido de Xposed: <http://repo.xposed.info/module/de.robv.android.xposed.installer>

Yang, S. H., Kim, H. S., Son, Y. H., & Han, S. K. (2014). Three-dimensional visible light indoor localization using AOA and RSS with multiple optical receivers. *Journal of Lightwave Technology*, 32(14), 2480-2485.

Zhong, Y., Wu, F., Zhang, J., & Dong, B. (2016). WiFi indoor localization based on K-means. *Audio, Language and Image Processing (ICALIP)*, 663-667.

Anexos

Anexo A – Análisis y Evaluación de Resultados

A.1. Pruebas en Ambiente Interno

Las pruebas en ambiente interno se presentan a continuación gráficamente y en tablas (valor de posiciones localizadas). Las tablas a continuación presentan n valores de estimación que representan las estimaciones encontradas (*rosado*).

A.1.1. Escenario 5x5m

- Estado estático

Tabla A.1.1. Posiciones en Ambiente Interno -Escenario 5x5m en estado estático

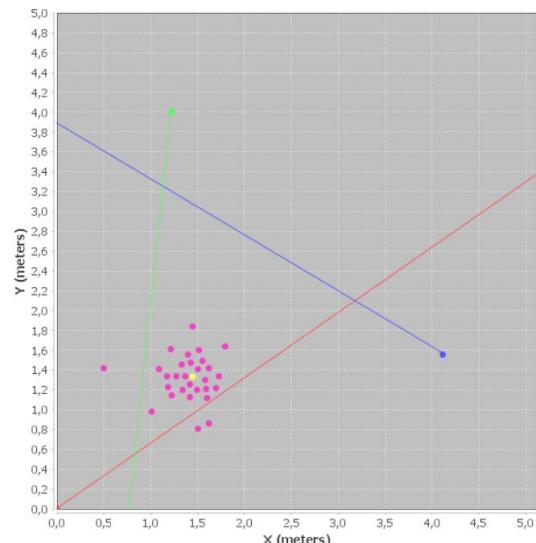


Figura A.1.1. Interfaz gráfica en Ambiente Interno- Escenario 5x5m en estado estático

Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)	Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)
1	1,41	1,25	16	1,01	0,98
2	1,37	1,47	17	0,51	1,41
3	1,51	1,21	18	1,54	1,21
4	1,65	1,14	19	1,46	1,46
5	1,24	1,61	20	1,50	1,41
6	1,38	1,45	21	1,52	1,27
7	1,42	1,21	22	1,74	1,21
8	1,25	1,32	23	1,47	1,56
9	1,36	1,19	24	1,51	1,42
10	1,69	0,89	25	1,52	1,40
11	1,21	1,32	26	1,75	1,34
12	1,18	1,40	27	1,50	1,60
13	1,50	0,80	28	1,48	1,85
14	1,21	1,12	29	1,76	1,61
15	1,17	1,21	30	1,41	1,25

- Estado dinámico lineal

Tabla A.1.2. Posiciones en Ambiente Interno- Escenario 5x5m en estado dinámico lineal

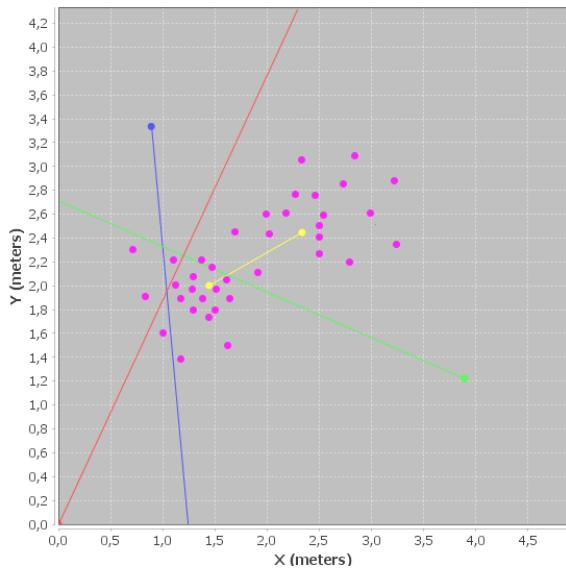


Figura A.1.2. Interfaz gráfica en Ambiente Interno-Escenario 5x5m en estado dinámico lineal

Punto Inicial			Punto Final		
Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)	Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)
1	1,51	1,98	1	2,05	2,42
2	1,50	1,80	2	1,98	2,61
3	1,41	2,21	3	3,25	2,35
4	1,21	1,91	4	2,22	2,61
5	1,48	2,17	5	2,27	2,78
6	1,71	1,51	6	2,31	3,07
7	1,39	1,90	7	2,84	3,11
8	1,25	2,19	8	2,50	2,29
9	1,48	1,78	9	2,47	2,77
10	1,26	1,97	10	2,50	2,40
11	1,18	2,21	11	2,50	2,51
12	1,31	1,81	12	2,78	2,21
13	1,67	2,08	13	2,53	2,59
14	0,72	2,31	14	3,24	2,87
15	1,22	1,39	15	2,75	2,86
16	1,18	2,01	16	3,00	2,61
17	1,23	1,89			
18	0,81	1,92			
19	1,01	1,59			

- Estado dinámico multilineal

Tabla A.1.3 Posiciones en Ambiente Interno-Escenario 5x5m en estado dinámico multilineal

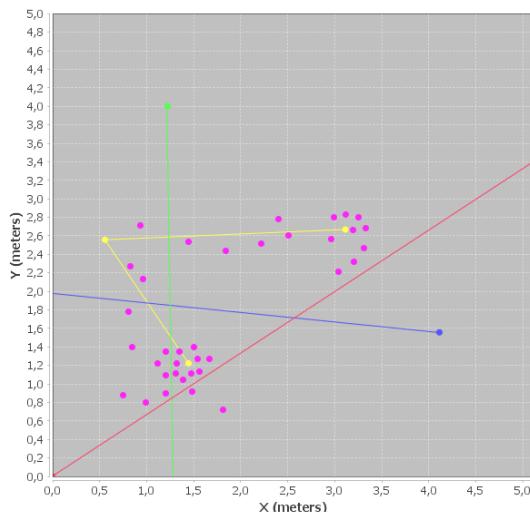


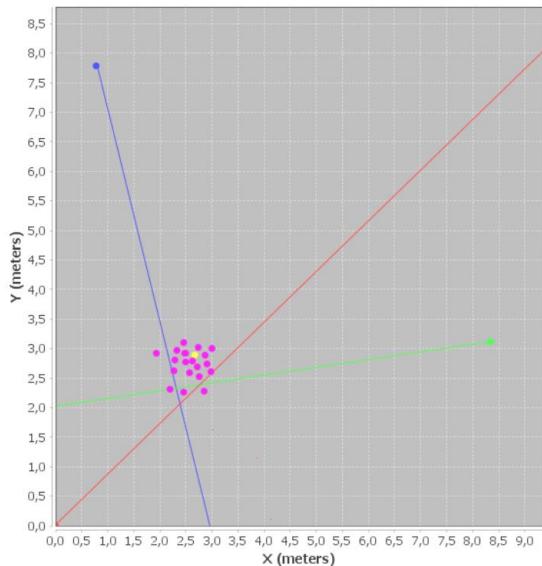
Figura A.1.3. Interfaz gráfica en Ambiente Interno-Escenario 5x5m en estado dinámico multilineal

Punto Inicial			Punto Final		
Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)	Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)
1	0,74	0,89	1	3,06	2,20
2	0,85	1,40	2	2,98	2,58
3	0,99	0,79	3	2,99	2,80
4	1,17	1,23	4	3,23	2,32
5	1,24	0,89	5	3,21	2,82
6	1,25	1,11	6	3,82	2,47
7	1,25	1,37	7	3,26	2,80
8	1,84	0,71	8	3,85	2,69
9	1,31	1,22	9	3,24	2,67
10	1,29	1,12	18	1,71	1,27
11	1,37	1,38			
12	1,48	0,91			
13	1,40	1,06			
14	1,51	1,4			
15	1,48	1,12			
16	1,56	1,29			
17	1,63	1,12			

A.1.2. Escenario 10x10m

- Estado estático

Tabla A.1.4. Posiciones en Ambiente Interno-Escenario 10x10m en estado estático

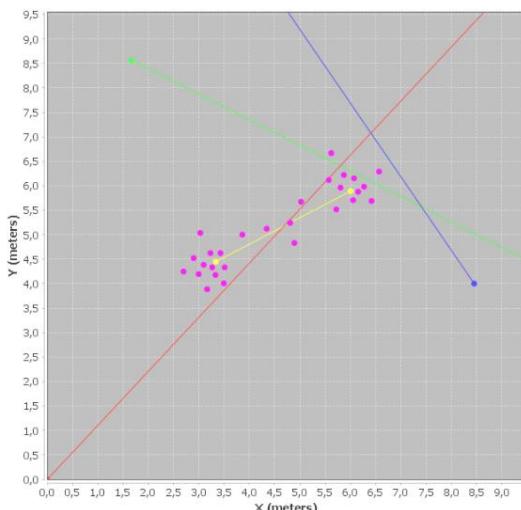


Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)	Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)
1	2,61	2,54	11	2,31	2,68
2	2,50	2,74	12	2,26	2,68
3	2,49	2,98	13	2,41	2,94
4	2,49	3,15	14	1,98	2,87
5	2,74	2,67	15	2,21	2,41
6	2,76	2,52	16	2,81	2,82
7	2,84	2,38	17	2,87	2,71
8	2,68	2,99	18	2,97	2,65
9	2,67	2,68	19	2,98	2,99
10	2,48	2,31			

Figura A.1.4. Interfaz gráfica en Ambiente Interno- Escenario 10x10m en estado estático

- Estado dinámico lineal

Tabla A.1.5. Posiciones en Ambiente Interno-Escenario 10x10m en estado dinámico lineal



Punto inicial			Punto final		
Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)	Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)
1	3,12	5,17	1	5,74	5,53
2	3,26	4,19	2	5,58	6,16
3	3,51	4,41	3	5,61	6,68
4	2,70	4,26	4	5,81	6,01
5	3,23	3,89	5	5,92	6,24
6	3,00	4,23	6	6,12	6,17
7	2,91	4,51	7	6,07	5,76
8	3,50	4,00	8	6,18	5,91
9	3,49	4,73	9	6,29	5,94
10	3,39	4,21	10	6,47	5,68
11	3,14	4,42	11	6,59	6,38
12	2,50	2,40			

Figura A.1.5. Interfaz gráfica en Ambiente Interno- Escenario 10x10m en estado dinámico lineal

- Estado dinámico multilineal

Tabla A.1.6. Posiciones en Ambiente Interno-Escenario 10x10m en estado dinámico multilineal

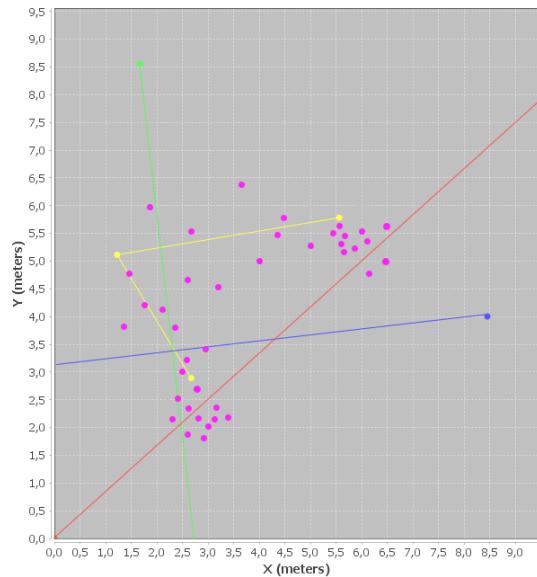


Figura A.1.6. Interfaz gráfica en Ambiente Interno- Escenario 10x10m en estado dinámico multilineal

Punto Inicial			Punto Final		
Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)	Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)
1	2,47	2,21	1	5,00	5,41
2	2,79	2,18	2	5,48	5,49
3	3,19	2,21	3	5,67	5,12
4	3,21	2,41	4	5,69	5,26
5	2,43	2,52	5	5,71	5,24
6	2,97	3,46	6	5,51	5,72
7	2,94	1,95	7	6,21	4,81
8	2,81	2,19	8	6,01	5,51
9	3,45	2,21	9	6,12	5,31
10	3,01	2,01	10	6,49	4,98
11	2,49	3,01	11	6,48	5,64
12	2,71	2,26	12	5,86	5,41
13	3,36	3,18			
14	2,64	1,91			

A.2. Pruebas en Ambiente Externo

En las siguientes gráficas y tablas se observa los resultados captados por los tres sensores, que dan lugar a distintas estimaciones obtenidas en ambientes externos, tanto en escenarios 5x5m y 10x10m

A.2.1. Escenario 5x5m

- Estado estático

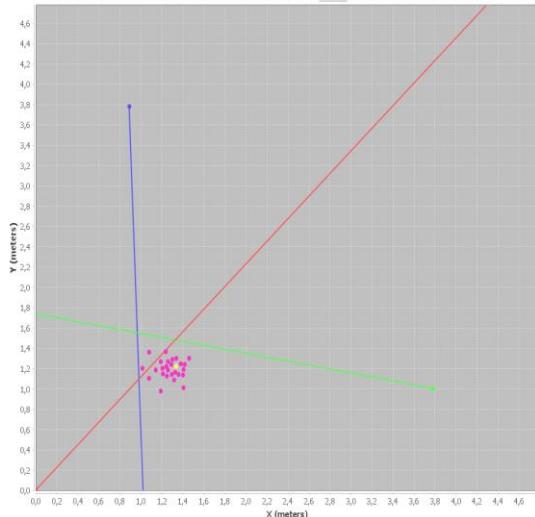


Figura A.2.1. Interfaz gráfica en Ambiente Externo- Escenario 5x5m en estado estático

Tabla A.2.1. Posiciones en Ambiente Externo -Escenario 5x5m en estado estático

Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)	Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)
1	1,19	0,97	14	1,40	1,16
2	1,08	1,12	15	1,24	1,22
3	1,40	1,02	16	1,19	1,29
4	1,02	1,21	17	1,40	1,20
5	1,32	1,11	18	1,28	1,26
6	1,27	1,13	19	1,26	1,28
7	1,23	1,14	20	1,24	1,38
8	1,15	1,19	21	1,31	1,31
9	1,30	1,14	22	1,38	1,25
10	1,20	1,20	23	1,41	1,24
11	1,26	1,18	24	1,31	1,32
12	1,33	1,17	25	1,48	1,31
13	1,36	1,16	26	1,09	1,36

- Estado dinámico lineal

Tabla A.2.2. Posiciones en Ambiente Externo- Escenario 5x5m en estado dinámico lineal

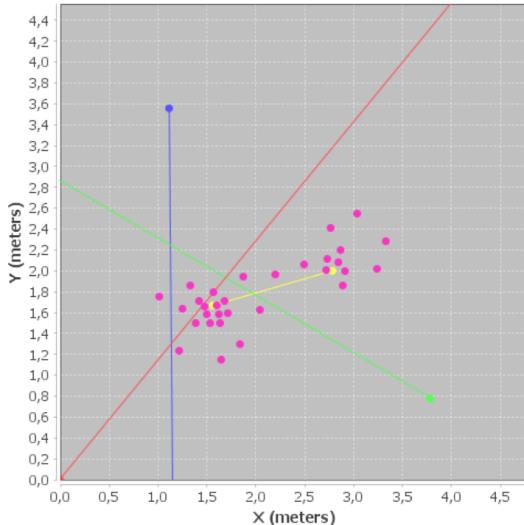


Figura A.2.2. Interfaz gráfica en Ambiente Externo-Escenario 5x5m en estado dinámico lineal

Punto Inicial			Punto Final		
Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)	Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)
1	1,24	1,21	1	2,50	2,24
2	1,73	1,17	2	2,74	2,01
3	1,37	1,51	3	2,75	2,11
4	1,26	1,64	4	2,89	1,84
5	1,00	1,78	5	2,76	2,41
6	1,84	1,31	6	1,74	2,09
7	1,53	1,49	7	2,92	2,00
8	1,50	1,59	8	2,84	2,19
9	1,49	1,64	9	3,04	2,55
10	1,41	1,71	10	3,26	2,01
11	1,69	1,51	11	2,38	2,30
12	1,32	1,86			
13	1,64	1,60			
14	1,61	1,71			
15	1,56	1,80			
16	1,74	1,60			
17	1,71	1,72			

- Estado dinámico multilineal

Tabla A.2.3. Posiciones en Ambiente Externo-Escenario 5x5m en estado dinámico multilineal

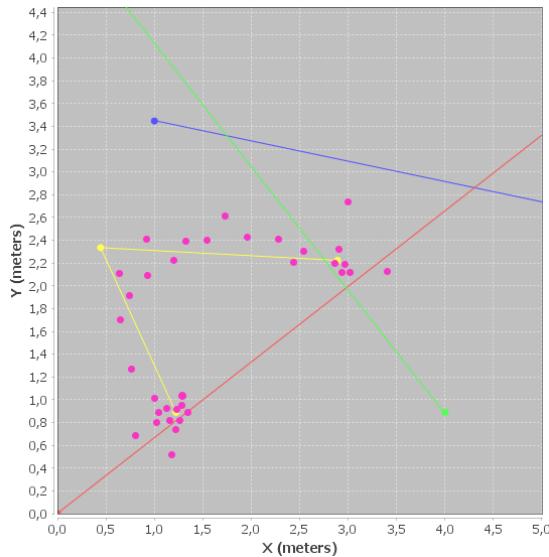


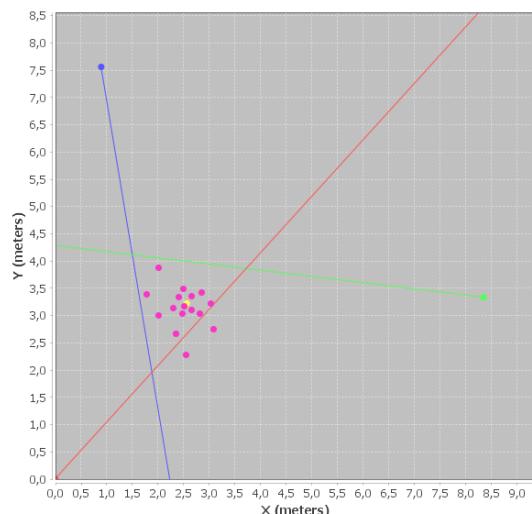
Figura A.2.3. Interfaz gráfica en Ambiente Externo-Escenario 5x5m en estado dinámico multilineal

Punto inicial			Punto Final		
Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)	Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)
1	0,81	0,72	1	2,54	2,31
2	1,21	0,52	2	2,96	2,11
3	1,02	0,80	3	2,87	2,20
4	1,00	1,00	4	3,01	2,12
5	1,26	0,74	5	2,92	2,32
6	1,16	0,91	6	2,98	2,19
7	1,19	0,82	7	3,41	2,12
8	1,17	0,93	8	3,01	2,72
9	1,32	0,82			
10	1,25	0,90			
11	1,39	0,87			
12	1,35	1,05			
13	1,32	0,94			
14	0,76	1,27			

A.2.2. Escenario 10x10m

- Estado estático

Tabla A.2.4. Posiciones en Ambiente Externo-Escenario 10x10m en estado estático

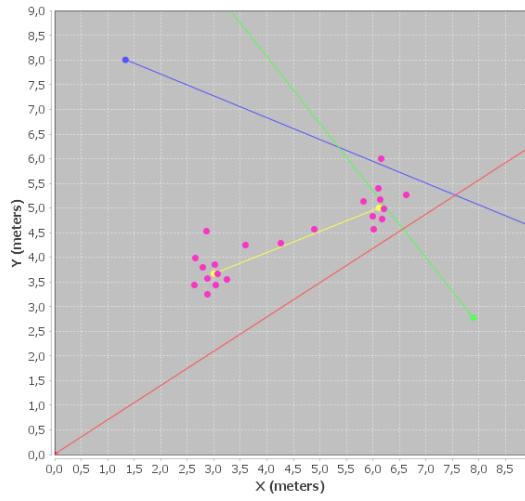


Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)	Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)
1	1,78	3,41	9	2,50	3,49
2	2,01	3,00	10	2,53	3,19
3	2,39	2,68	11	2,68	3,16
4	2,56	2,27	12	3,14	2,76
5	2,02	3,90	13	2,67	3,38
6	2,31	3,17	14	2,84	3,04
7	2,49	3,04	15	2,91	3,46
8	2,42	3,38	16	3,09	3,24

Figura A.2.4. Interfaz gráfica en Ambiente Externo- Escenario 10x10m en estado estático

- Estado dinámico lineal

Tabla A.2.5. Posiciones en Ambiente Externo-Escenario 10x10m en estado dinámico lineal

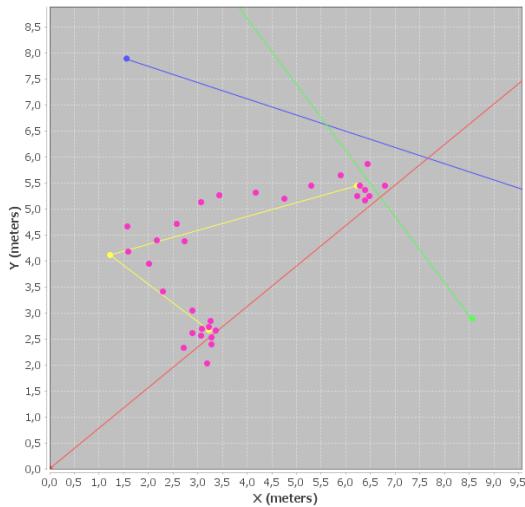


Punto inicial			Punto Final		
Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)	Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)
1	2,63	3,46	1	6,10	4,55
2	2,89	3,24	2	5,79	5,19
3	2,68	3,98	3	6,01	4,81
4	2,77	3,81	4	6,19	6,02
5	2,89	3,54	5	6,13	5,43
6	3,07	3,47	6	3,72	5,18
7	2,88	4,56	7	6,21	4,76
8	3,02	3,85	8	6,26	4,98
9	3,11	3,69	9	6,61	5,28
10	3,28	3,53			
11	3,63	4,27			

Figura A.2.5. Interfaz gráfica en Ambiente Externo- Escenario 10x10m en estado dinámico lineal

- Estado dinámico multilineal

Tabla A.2.6. Posiciones en Ambiente Externo-Escenario 10x10m en estado dinámico multilineal



Punto inicial			Punto Final		
Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)	Punto	Eje X (m)	Eje Y (m)
1	2,71	2,39	1	5,89	5,64
2	3,22	2,05	2	6,27	5,46
3	2,93	2,62	3	6,21	5,23
4	3,14	2,58	4	6,40	5,18
5	3,34	2,41	5	6,39	5,38
6	3,15	2,72	6	6,47	5,40
7	2,91	3,12	7	6,49	5,24
8	3,24	2,69	8	6,82	5,48
9	3,39	2,59			
10	3,31	2,54			
11	3,32	2,87			

Figura A.2.6. Interfaz gráfica en Ambiente Externo- Escenario 10x10m en estado dinámico multilineal

A.3. Pruebas de la Intensidad de la Señal Recibida

Tanto en ambientes internos y externos se usa tres nodos sensores que captan la intensidad de la señal. Las siguientes gráficas y tablas muestran que nodo obtuvo mayor precisión (valores más altos significa mejor señal).

A.3.1. Pruebas en Ambiente Interno y Externo

A continuación, se presentan tablas comparativas entre ambiente interno y externo, para las tres evaluaciones (estado del drone) en cada uno de los escenarios 5x5m y 10x10m.

A.3.1.1. Escenario 5x5m

- Estado estático

Tabla A.3.1. Ambiente Interno y Externo-Escenario 5x5m en estado estático-Intensidad de Señal

	Nodo Sensor	Señal Recibida Antena Yagi (dBm)	Señal Recibida Smartphone (dBm)
Internoo	1	-61	-54
	2	-69	-67
	3	-60	-64
Externo	1	-66	-67
	2	-69	-70
	3	-63	-60

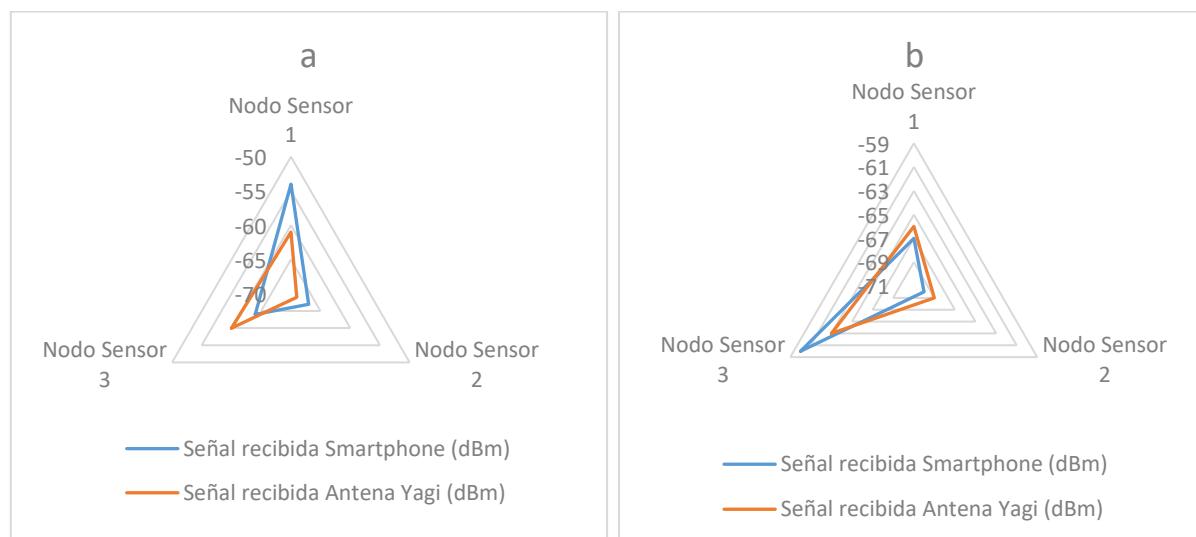


Figura A.3.1. (a) Ambiente Interno - (b) Ambiente Externo - Escenario 5x5m en estado estático - Intensidad de señal

- Estado dinámico lineal

Tabla A.3.2. Ambiente Interno y Externo-Escenario 5x5m en estado dinámico lineal-Intensidad de Señal

Punto Inicial			
	Nodo Sensor	Señal Recibida Antena Yagi (dBm)	Señal Recibida Smartphone (dBm)
Interno	1	-67	-67
	2	-72	-71
	3	-69	-67
Externo	1	-60	-61
	2	-68	-67
	3	-61	-65
Punto Final			
	Nodo Sensor	Señal Recibida Antena Yagi (dBm)	Señal Recibida Smartphone (dBm)
Interno	1	-72	-74
	2	-67	-69
	3	-68	-69
Externo	1	-72	-73
	2	-72	-69
	3	-63	-65

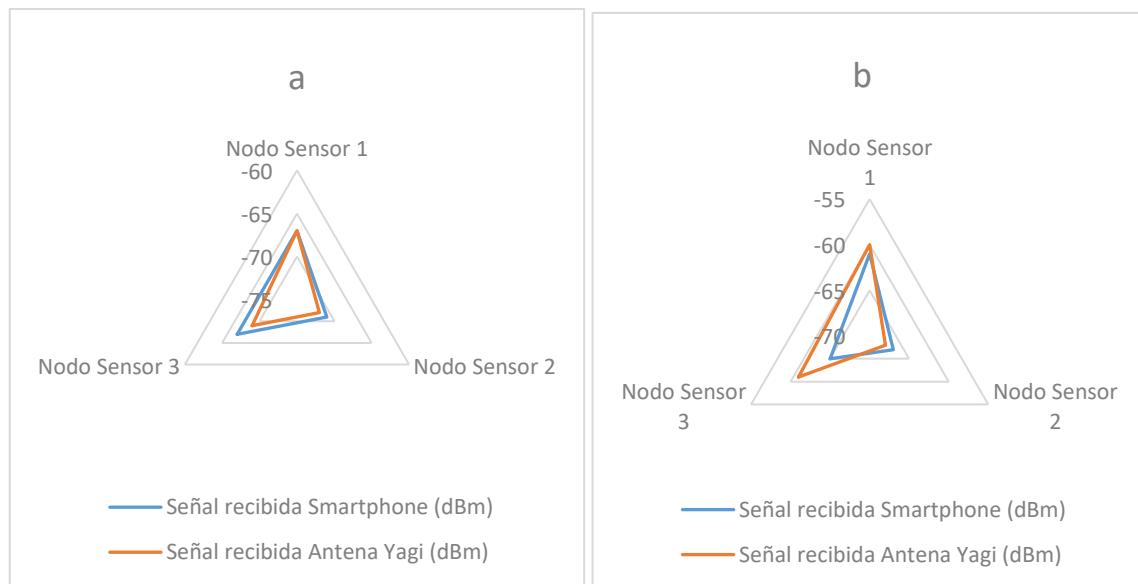


Figura A.3.2. (a)Ambiente Interno - (b)Ambiente Externo - Escenario 5x5m en estado dinámico lineal - Intensidad de señal (Punto Inicial)

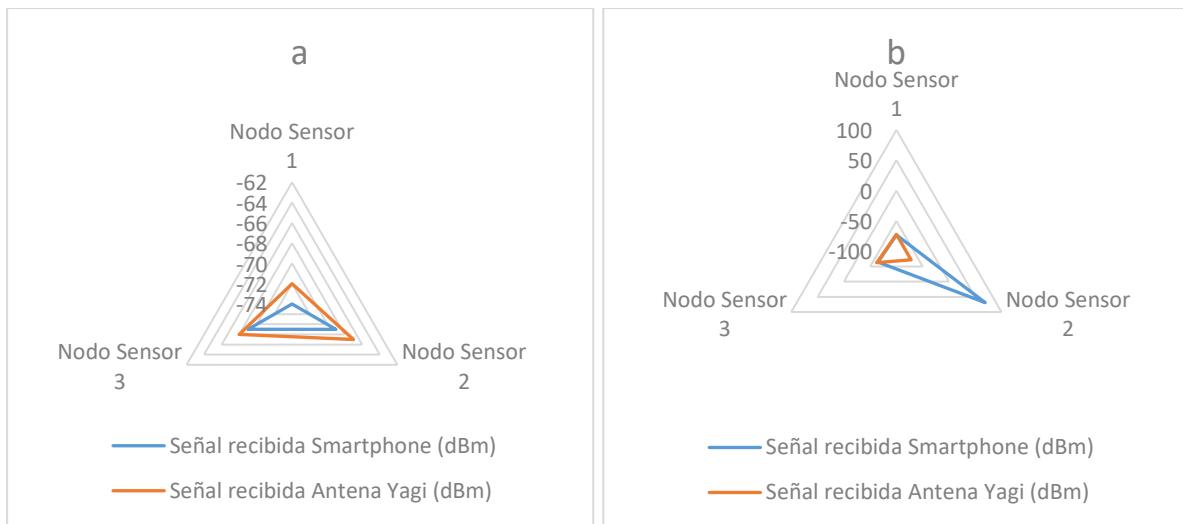
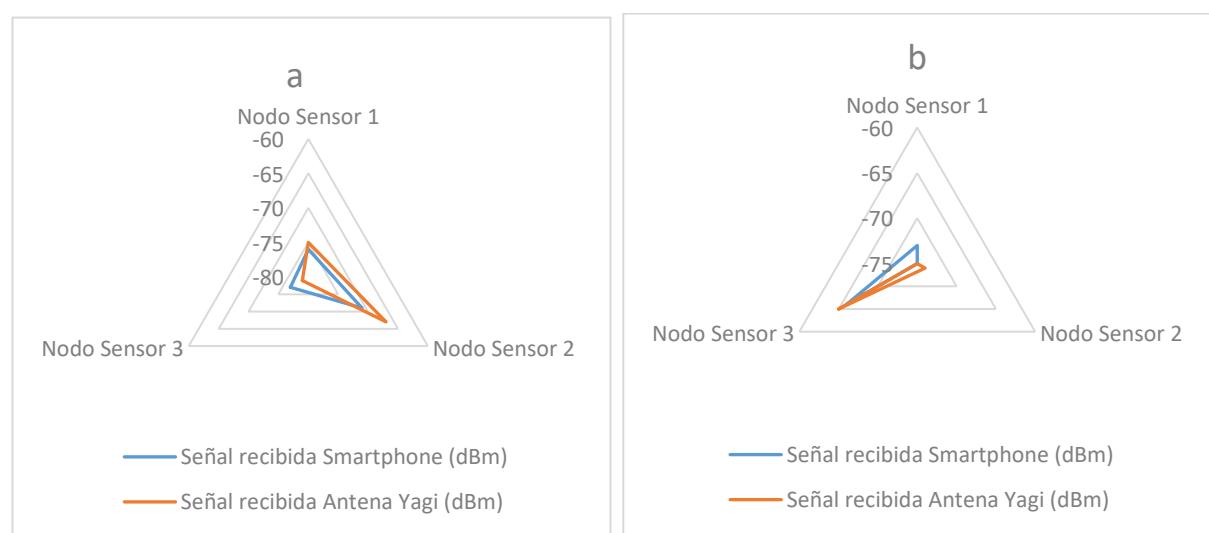
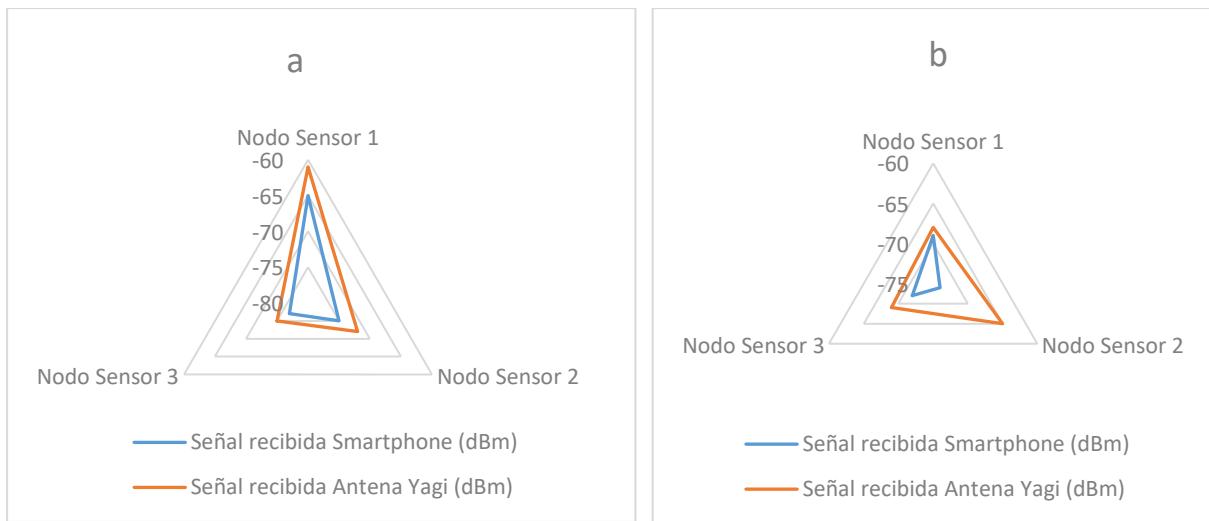


Figura A.3.3. (a) Ambiente Interno - (b) Ambiente Externo - Escenario 5x5m en estado dinámico lineal - Intensidad de señal (Punto Final)

- **Estado dinámico multilineal**

Tabla A.3.3. Ambiente Interno y Externo-Escenario 5x5m en estado dinámico multilineal- Intensidad de Señal

Punto inicial			
	Nodo Sensor	Señal Recibida Antena Yagi (dBm)	Señal Recibida Smartphone (dBm)
Interno	1	-61	-65
	2	-72	-75
	3	-75	-77
Externo	1	-68	-69
	2	-65	-74
	3	-69	-72
Punto final			
	Nodo Sensor	Señal Recibida Antena Yagi (dBm)	Señal Recibida Smartphone (dBm)
Interno	1	-75	-76
	2	-67	-71
	3	-79	-77
Externo	1	-75	-73
	2	-74	-75
	3	-65	-66



A.3.1.2. Escenario 10x10m

- Estado estático

Tabla A.3.4. Ambiente Interno y Externo-Escenario 10x10m en estado estático-Intensidad de Señal

	Nodo Sensor	Señal Recibida Antena Yagi (dBm)	Señal Recibida Smartphone (dBm)
Internoo	1	-71	-72
	2	-72	-74
	3	-76	-77
Externo	1	-75	-81
	2	-77	-78
	3	-79	-79

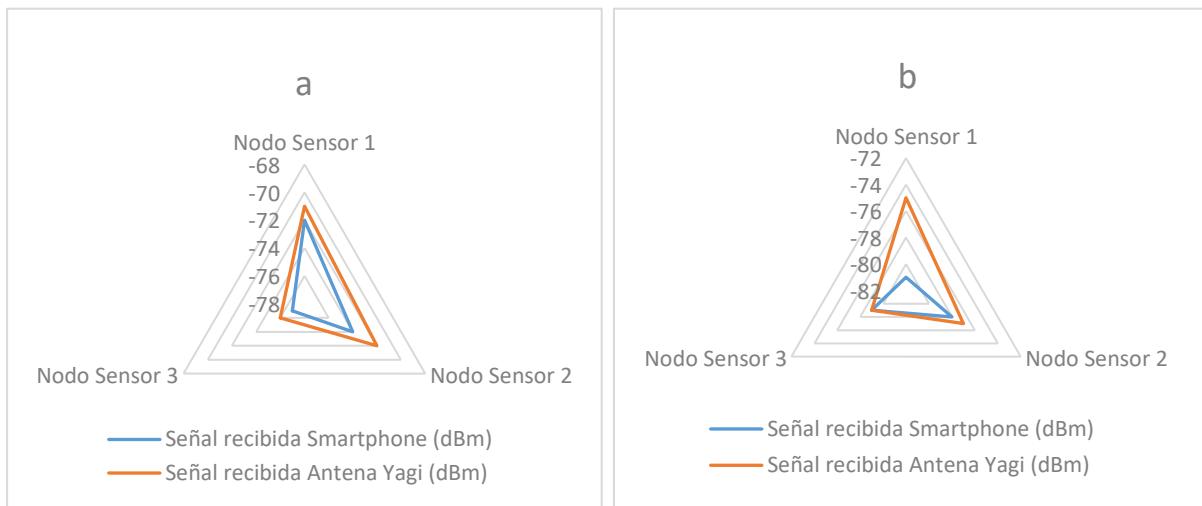


Figura A.3.6. (a) Ambiente Interno - (b) Ambiente Externo - Escenario 10x10m en estado estático - Intensidad de señal

- Estado dinámico lineal

Tabla A.3.5. Ambiente Interno y Externo-Escenario 10x10m en estado dinámico lineal- Intensidad de Señal

Punto inicial			
	Nodo Sensor	Señal Recibida Antena Yagi (dBm)	Señal Recibida Smartphone (dBm)
Internoo	1	-78	-77
	2	-77	-77
	3	-71	-74
Externo	1	-81	-82
	2	-81	-81

	3	-72	-74
Punto final			
	Nodo Sensor	Señal Recibida Antena Yagi (dBm)	Señal Recibida Smartphone (dBm)
Interno	1	-81	-80
	2	-71	-71
	3	-74	-75
Externo	1	-81	-86
	2	-72	-75
	3	-75	-76

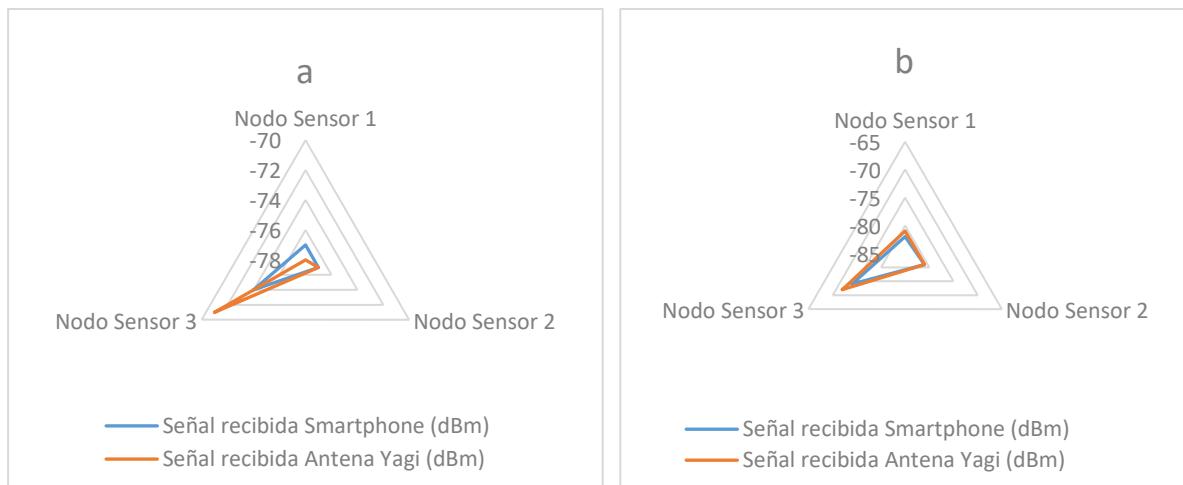


Figura A.3.7. (a) Ambiente Interno - (b) Ambiente Externo - Escenario 10x10m en estado dinámico lineal - Intensidad de señal (Punto Inicial)

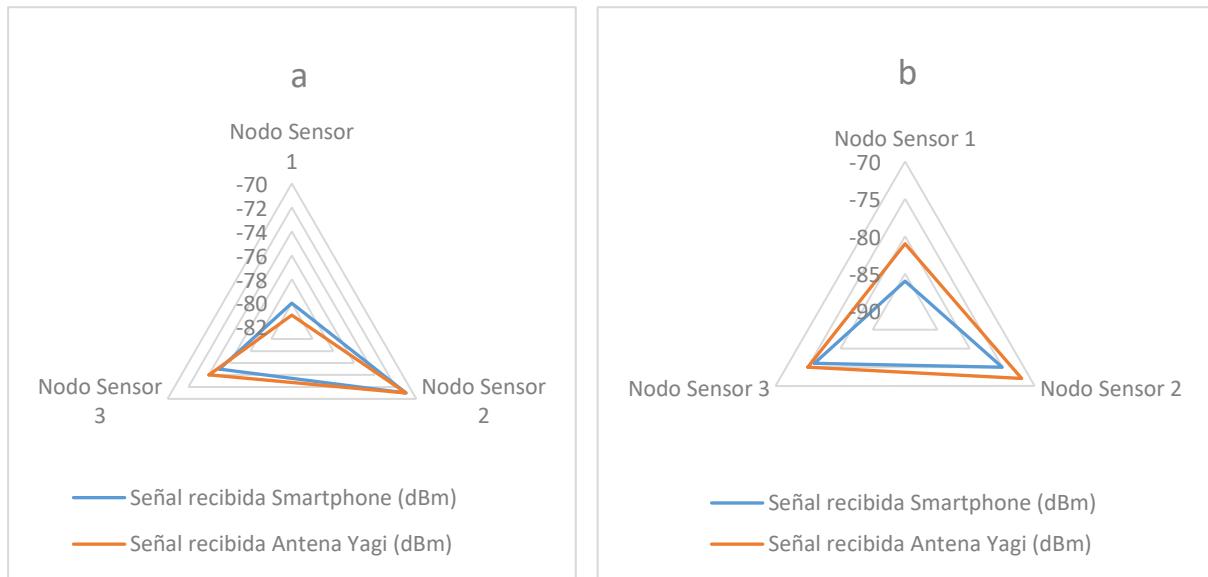


Figura A.3.8. (a) Ambiente Interno - (b) Ambiente Externo - Escenario 10x10m en estado dinámico lineal - Intensidad de señal (Punto Final)

- Estado dinámico multilineal

Tabla A.3.6. Ambiente Interno y Externo-Escenario 10x10m en estado dinámico multilineal- Intensidad de Señal

Punto inicial			
	Nodo Sensor	Señal Recibida Antena Yagi (dBm)	Señal Recibida Smartphone (dBm)
Interno	1	-71	-73
	2	-78	-77
	3	-70	-71
Externo	1	-75	-76
	2	-77	-77
	3	-79	-79
Punto final			
	Nodo Sensor	Señal Recibida Antena Yagi (dBm)	Señal Recibida Smartphone (dBm)
Interno	1	-79	-80
	2	-75	-78
	3	-75	-75
Externo	1	-82	-83
	2	-72	-77
	3	-81	-82

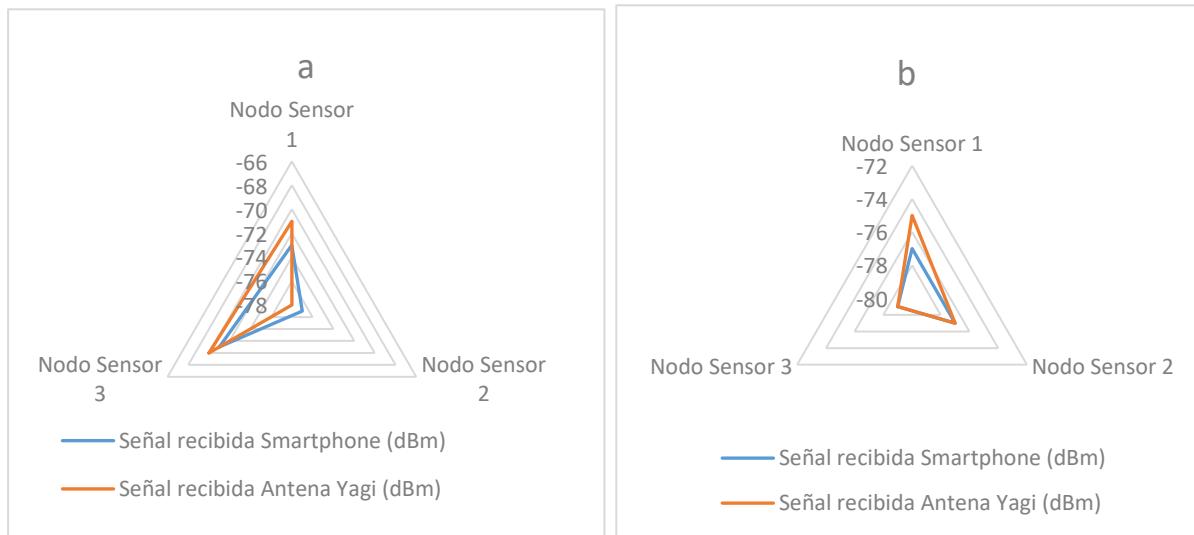


Figura A.3.9. (a)Ambiente Interno - (b)Ambiente Externo - Escenario 10x10m en estado dinámico multilineal - Intensidad de señal (Punto Inicial)

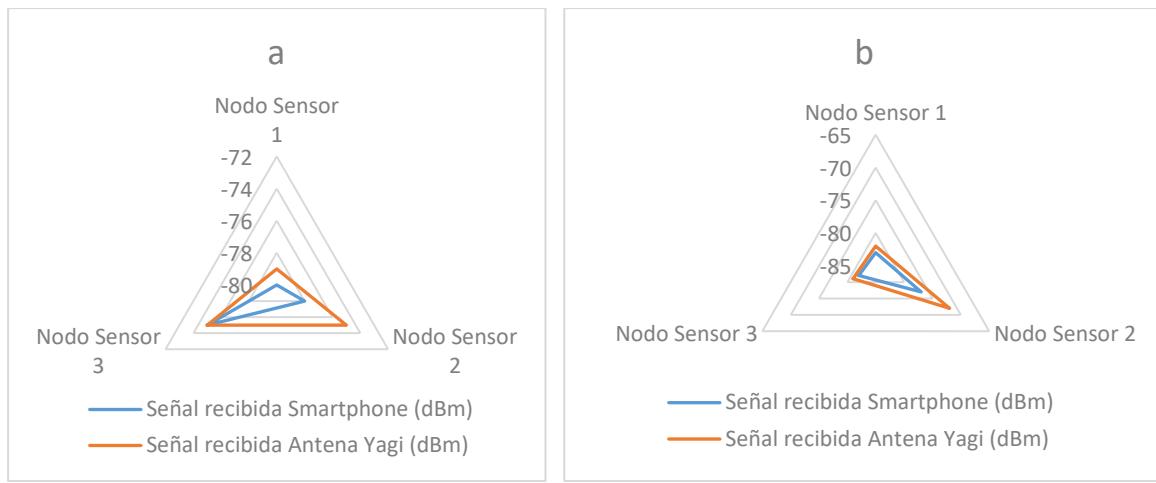


Figura A.3.10. (a) Ambiente Interno - (b) Ambiente Externo - Escenario 10x10m en estado dinámico multilineal - Intensidad de señal (Punto Final)

Anexo B – Paper Científico

3D Localization System for an Unmanned Mini Quadcopter based on Smart Indoor Wi-Fi Antennas

Daniela Flores^{1,2}, Diego Marcillo², João Pereira¹

¹ Department of Computer Science Engineering, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Politécnico de Leiria.

Apartado 4163, 2411-901 Leiria, Portugal
2152213@my.ipleiria.pt, joao.pereira@ipleiria.pt

² Grupo de Investigación en Modelos de Producción de Software, Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Av. General Rumiñahui S/N, Sangolquí, Ecuador, Apartado 171-5-231B
dmmarcillo@espe.edu.ec

³ Instituto de Telecomunicações, Portugal

Abstract. Technology has created a new world of smart mobility with the objective of satisfying human needs with more functionality. This research work is about how to create a 3D localization system using the Angle of Arrival (AoA) technique, combined with Wi-Fi technology and motorized directional antennas. Our objective is to locate an unmanned aerial vehicle (UAV) that is driven with the help of a smart network of directional antennas. The mini UAV will automatically follow a planned route around an object, using Wi-Fi smart techniques. Our results show that a network of smart antennas can be used to locate a UAV with high precision.

Keywords: Localization system, UAV, Wi-Fi, smart antennas, indoor and outdoor environments.

1 Introduction

Nowadays, similarly to the past years, technology has been able to show us a continuous increase of the required information that is key to different services that the global market demands. Starting in the year 2000, some scientists focus their vision in location services, which means that each object should be conscious of its location and may be regularly sending the data to a server which stores the useful information [1]. Nowadays, technology has evolved per the human needs, such as real time location, sensors and other embedded controllers that can transform everyday objects into smart objects so that they can act according to the environment [2].

Wireless Sensor Networks (WSNs) compose numerous devices associated in different areas [1], [3], allowing the control of the communication, velocity, temperature, sound and movement. These conditions have developed different systems and one example of this is the Global Positioning System (GPS), which is a localization system that provides both information of the location and time in different weather conditions [4]. GPS is a system completely based on satellites which brings its functionalities to both indoors and outdoors environments [5]. However, this system doesn't work as expected with the so called ubiquitous devices since they

show some problems regarding interiors and urban infrastructures. The limitation of the GPS on enclosed spaces, dense forests, mountains, and other obstacles that block the line of sight doesn't allow it to work precisely, which generates a positioning error around 10 meters [3]. Solutions to this problem have come in the form of alternative systems such as the IEEE 802.11 technology [6], used in wireless communications. One of those are the smart antennas that work with Wi-Fi. These contain multiple components that receive signals that are combined in a smart way to improve the performance of the wireless system [7]. Besides increasing the range of the signal and suppressing signal interferences [8], they are used with unmanned aerial vehicles that are able to connect between them or to a base station (BS) [9].

In this context, and with the objective of guaranteeing that the development of the technology has been in benefit of indoor positioning, the navigation is detailed and shown through means of maps and models, including information of objects, people and different spaces. As such, for example, the recent developments in technology are inertial sensors like accelerometers and gyroscopes that can be found in mobile devices. This technology combines with the way images are captured with cameras, intensity of the magnetic field, detected signals or infrared images. However, the development and investigation of different navigation systems have been focused in the lowest possible error of positioning and object precision [10].

The investigation hypothesis of the present study is the distribution of smart antennas that provide a localization system for an unmanned mini quadcopter, which requires the existence of a mathematical evaluation and assesses the erroneous distance regarding the real position. The basic questions that allow the guidance of this investigation are: What technology is viable for aerial localization with the purpose of locating unmanned mini aerial vehicles? And what is the most efficient localization method to obtain the minimum distance error regarding the real scenario?

Therefore, the objective of this work is to create a UAV localization system through the means of smart motorized antennas. Our UAV follows a planned route around an object and takes some photos that are then used to create a 3D model of the object based on a 3D scanner application.

The next sections of this paper are organized in the following way. The technologies used are exposed in section 2. Section 3 describes the theoretical frame in which the UAVs localization system is based. Section 4 presents some experimental results. And finally, the section 5 finishes with some conclusions.

2 Implemented Technologies

This section describes the technologies that have been used to implement the described solution. All electronic devices used in this system are affordable and available to the general user.

One of the devices is a mini drone which is a UAV that can be controlled remotely and has very small dimensions compared to the more usual UAVs. It has a camera and the ability to take photos so that a 3D model can be built from those pictures. In this implementation, the model Cheerson CX-10W has been used. It is controlled via Wi-Fi through a mobile application and has a 0.3 MP camera with a resolution of 720 x 576 pixels. It can also send a video stream to a smartphone application [11].

An ESP8266 Wi-Fi module is capable of receiving and transmitting data in a wireless fashion, as well as detecting the power of the signals transmitted by other antennas. In this project, two distinct models have been used: the ESP8266-01 and the ESP8266-12. These modules can be programmed using the Arduino Integrated Development Environment (IDE) and offer a set of General Purpose Input/Output (GPIO) pins to control external components [12].

The ESP8266-12 is used to sense the signal transmitted by the drone while the ESP8266-01 is used to send that information to a computer. When data is received, it is sent to the other module through a serial connection and then sent to the computer wirelessly. The reason for using two distinct ESP8266, per Wi-Fi antenna, was to perform two Wi-Fi connections simultaneously. One to the Drone CX-10W and another to a router, without loss of efficiency.

Servo motors are types of motors that allow their rotations to be controlled with high precision. Both Direct Current (DC) and Alternate Current (AC) exist [13]. In this project, servo motors have been used to rotate the antenna so that it can sweep a given area and sense automatically the Wi-Fi signal from multiple angles. In this project, some SG90 model DC motors have been used. This model is ideal due to its size, price, and performance. This servo motor executes a controlled rotation of a Yagi antenna so that precise angle is known when the maximum Received Signal Strength Indication (RSSI) is measured.

Yagi antennas are directional antennas that are composed of multiple rods fixed on a mast. They consist on a driven dipole, a reflector dipole and one or more director dipoles. The dipoles are mounted in the same plane, attached to the mast. This setup gives Radio Frequency (RF) signals a directional boost. They are used in the field of communication and greatly used both in the military sector and by civilians [14].

In this project a Yagi antenna has been used with a receiver to identify the position at which the best Wi-Fi signal can be acquired. By rotating the antenna around a fixed point and calculating the angle at which the best signal is found give us a general idea of the direction of the Wi-Fi source (our Wi-Fi mini drone). A low-cost 3D printed Yagi antenna was used for our project based on the model [15]. The list of all required components is as follow: 1 *Drone*: Cheerson CX-10W, 1 *Receiver*: ESP8266 ESP-12 Evaluation Board, 1 *Emitter*: ESP8266-01, 1 *Router*: ADB 4000N, 1 *Laptop Dell Inspiron 15*, 1 *3D printed Yagi Antenna*.

3 System Design

This section describes the design and implementation of the system to locate UAVs through smart antennas used in indoor environments. The Fig. 1 a) shows the system architecture that has been implemented. There are four main components: a centralized computer for control, a router with Wi-Fi, a drone with Wi-Fi and a set of sensing points (directional Wi-Fi antennas with servo motors). The drone is the base component of the whole setup. It distributes a Wi-Fi signal to which the sensing points should be connected. Each sensing point is comprised of two components: a Receiver (ESP-12) and an Emitter (ESP-01). These two components are wired through a serial connection as shown in Fig. 1 b).

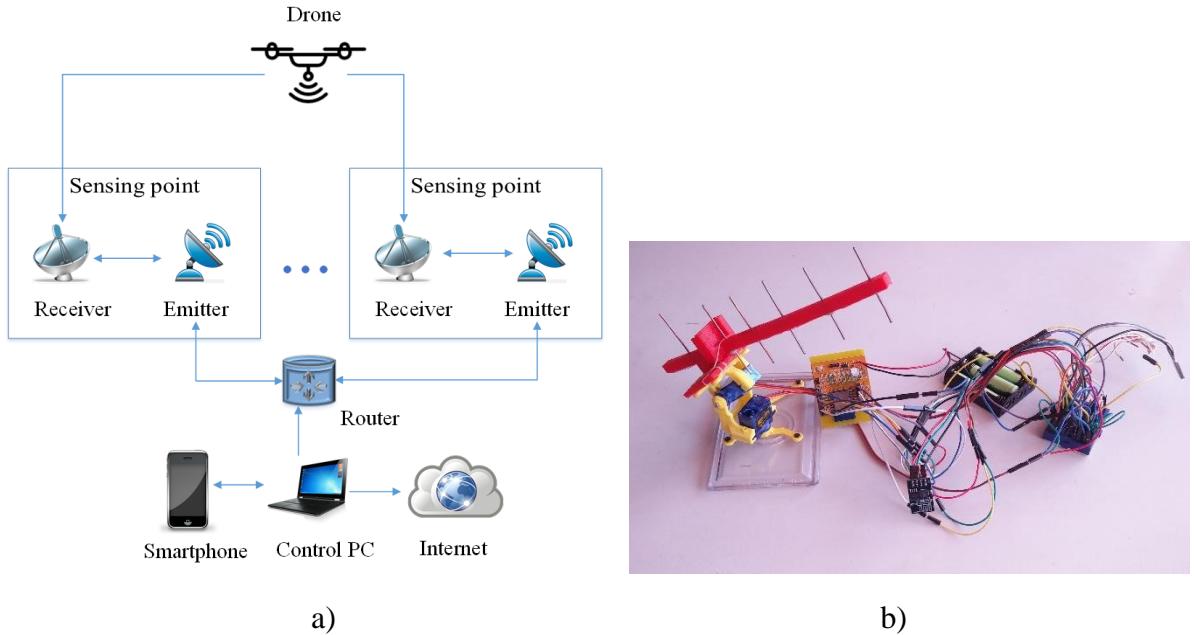


Fig. 1. a) System Architecture. b) 3D Printed Robotic Arm with Yagi Antenna.

The Receiver is responsible for sensing the signal of the wireless network distributed by the Drone CX-10W, reading its RSSI and sending it to the Emitter. The Emitter is connected to a central router via Wi-Fi, which groups all sensing points and the control computer. This allows for an easier management and reduces the number of required connections on the computer. When an Emitter receives data from the Receiver (via serial communication), these data are immediately sent to the control computer (via Wi-Fi communication), which manages the whole operation. The computer is responsible for starting the process, receiving and processing the data, and showing the information to the user.

On the computer, the process is managed by a graphical Java application which uses the Google Maps Application Programming Interface (API) [16] to allow the user to indicate the positions and Internet Protocol (IP) addresses of the sensing points and, therefore, requires an Internet connection to show the maps. Our application also requires a smartphone to be connected so that it can take photos from the drone's camera and send them back since the video stream cannot be directly extracted from the Drone CX-10W. This smartphone communication is performed through the computer's Universal Serial Bus (USB) port.

Smart antennas based localization is performed using the AoA technique [17]. This is a method that uses the direction of the antennas to calculate the position of a station, which is in this case the UAV. To find the location, the antennas measure the RSSI and calculate the angle at which the maximum value is found. With this information, a line can be traced between the antenna and the station. By grouping at least one more antenna it is possible to find the intersection of two of those lines which should indicate the position of the station.

Assuming that there are two antennas A and B with coordinates (a_x, a_y) and (b_x, b_y) , and angles θ_A and θ_B respectively and that P is the calculated intersection point with coordinates (p_x, p_y) , its position can be found using the following system of equations:

$$p_x = \frac{a_x \times \tan \theta_A - b_x \times \tan \theta_B + b_y - a_y}{\tan \theta_A - \tan \theta_B}. \quad (1)$$

$$p_y = \frac{(a_x - b_x) \times \tan \theta_A \times \tan \theta_B + b_y \times \tan \theta_A - a_y \times \tan \theta_B}{\tan \theta_A - \tan \theta_B}. \quad (2)$$

Multiple intersections can be found and in this project, an average aggregation method was used [17]. With this method, assuming that we have a set of N intersection points represented by a pair of coordinates (x_i, y_i) , where $i=1, 2, \dots, N$, the average point (x, y) of all intersections can be found using the following equations:

$$x = \sum_{i=1}^N x_i / N. \quad (3)$$

$$y = \sum_{i=1}^N y_i / N. \quad (4)$$

The average point indicated by (3) and (4) will estimate the location of the UAV. Once this point is obtained, a graph that shows the flight path of the drone is updated with the new position and its flight is adjusted to perform a new route accordingly.

4 Experimental Evaluation

This section describes how the test scenario was set up to assess the stability and viability of the system and provides a resume of our analysis and our measurements.

The tests were executed in an indoor scenario so that it is possible to have an idea of the impact of the multiple obstacles (walls, pillars, etc.) found inside buildings when compared to an open environment. Whenever it is possible, we should always minimize any factors that may cause random deviations in the measurements.

We started our measurements using a short space to drive autonomously our mini drone. A space of 3 x 3 meters was defined as a Cartesian plane. The plane had a reference point that marked the origin of two perpendicular X and Y axis. This helped the positioning calculations of our sensing points relatively to each other and also the measurements since a reference point is used.

In our indoor scenario, for each setup, three distinct sensing points were used. Since only one antenna was available in the preliminary stage, it was necessary to take the measures one at a time for different sensing positions. However, the position calculations were made as if three sensing points were used. Even though only one point was measured at a time, we can clearly see that it's practically possible to use our configuration. In each setup, a set of ten samples was collected by rotating the sensing points around the drone, positioned on the coordinates (1.5, 1.5), while always keeping their relative positions.

Fig. 2 shows how the scenario was set up. Each sensing point was rotated 10 times in steps of 10 degrees in a counter clockwise way around the drone. In each position, the sensing point with two servo motors and a Wi-Fi antenna performed a horizontal sweep and reported the data.

Table 1. Indoors test results

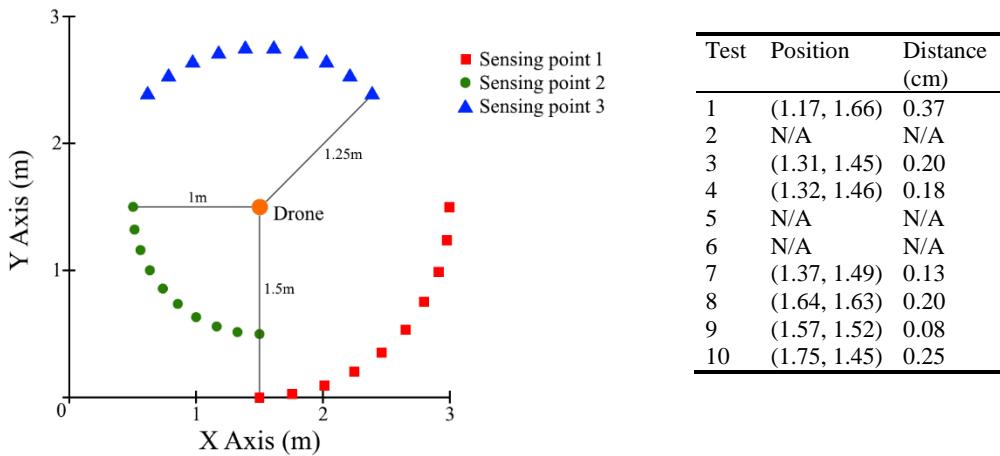


Fig. 2. Indoor measurements

In each position, the best Wi-Fi signal of all sensing points was measured. One of the two servo motors performed steps of one degree at a time, starting at the 20° and finishing on the 160° position, reading the RSSI with every step. This means that the antenna made a large sweep of 140°. When the sensing point was moved 10° around the drone, its pointing angles also rotated 10° in a counter-clockwise way (with the antennas pointed to the central position of the drone).

In our indoor scenario, the results were quite positive. We obtained a maximum positioning error of approximately 37 cm with 7 valid measurements. The average Euclidean distance of all estimated points to the drone was approximately 20 cm. The distance between the centroid point of all measurements and the real position of the drone was only 5.7 cm. However, in the set of ten measurements, it was not possible to calculate the coordinates of the drone in three positions, as presented in Table 1. This may be caused by multiple factors that cannot be controlled. For example, the presence of other wireless networks can interfere or the reflected signals can cause multipath interferences. This may result in some inaccurate results [18].

5 Conclusion

A 3D location system for UAVs was developed through a physical disposition of smart Wi-Fi antennas. The used technologies are small Yagi antennas that emit and receive electromagnetic waves in the direction of a Wi-Fi UAV. In our project, these antennas are used to read the signal and the angle of arrival of a Wi-Fi UAV. With these data, we can estimate the position of our

mini UAV using an aggregation method. Our real indoor scenario measurements show us that the distance between the centroid point of all measurements and the real position of the drone was only 5.7 cm.

For future work, the usability of the system must be assessed in a 3D environment. The system is ready to support it by using both the vertical and horizontal antennas in each sensing point. Measurements must also be made regarding the time taken to read the data and verifying if it's reliable when controlling the UAV in real time.

References

1. Mokbel, M., Chow, C.Y., Aref, W.G.: Location Data Management: a Tale of Two Systems and the “Next Destination”!. In: Proceedings of the VLDB Endowment, vol. 9, No 13, 1622-1622 (2016).
2. Cook, D.J., Das, S.K.: Smart Environments, Technology, Protocols and Applications. Wiley Inter-Science, (2005).
3. Kuo, W.H., Chen, Y.S., Jen, G.T., Lu, T.W.: An Intelligent Positioning Approach: RSSI-Based Indoor and Outdoor Localization Scheme in ZigBee Networks. In: International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Vol. 6, pp. 2754-2759. IEEE, (2010).
4. Aakyaag, N., Frey, J.E.: Redes de Sensores Inalámbricos. ABB Magazine, (2006).
5. Dubey, A. K.: Global Positioning System. Understanding an Orogenic Belt. Springer International Publishing, pp. 215-230. (2014).
6. Garg, V., Jhamb, M.: A Review of Wireless Sensor Network on Localization Techniques. In: International Journal of Engineering Trends and Technology, Vol 4. IJETT, (2013).
7. Winters, J. H.: Smart Antennas for Wireless Systems. In: IEEE Personal Communications, vol 5, pp. 23-27. IEEE, (2002).
8. Austin, R. In: Unmanned Aircraft Systems: UAVs Design, Development, and Deployment. In: John Wiley & Sons, vol. 54. (2011).
9. Asadpour, M., Giustiniano, D., Hummel, K. A., Heimlicher, S.: Characterizing 802.11 n Aerial Communication. In Proceedings of the second ACM MobiHoc workshop on Airborne Networks and Communications, pp. 7-12. ACM, (2013).
10. Khoshelham, K., Zlatanova, S.: Sensors for Indoor Mapping and Navigation. In: Sensors, vol. 16, No 5, 655. (2016).
11. First Quadcopter, Cheerson CX-10W Review, <http://www.firstquadcopter.com/quadcopter-reviews/cheerson-cx-10w-review/>. (2016).
12. Patel, K.K., Patoliya, J., Patel, H.: Low Cost Home Automation with ESP8266 and Lightweight protocol MQTT. In: Transactions on Engineering and Sciences, vol. 3. (2015).
13. Krishnan, R.: Selection Criteria for Servo Motor Drives. In: IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 2, pp. 270-275. (1987).
14. Kaneda, N., Deal, W.R., Qian, Y., Wterhouse, R., Itoh, T.: A broadband planar quasi-Yagi antenna. In: IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol 50, pp. 1158-1160. (2002).
15. Directional YAGI WLAN Antenna Extension for 2.4GHz, <http://www.thingiverse.com/thing:19548>. (2012).
16. Google Maps APIs, <https://developers.google.com/maps/>. (2016).
17. Shan, Z., Yum, T.S.P.: Precise Localization with Smart Antennas in Ad-Hoc Networks. In: IEEE Global Telecommunications Conference, pp. 1053-1057. IEEE, (2007).
18. Antenna Considerations in the Deployment of Wireless Broadband Networks, <http://www.fieldtechnologiesonline.com/doc/antenna-considerations-in-the-deployment-of-w-0001>. (2016).

Anexo C – Paper Científico

3D Scanner Based on an Autonomous Wi-Fi Unmanned Mini Quadcopter

Daniela Flores^{1,2}, Diego Marcillo², João Pereira^{1,3}

¹ Department of Computer Science Engineering, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Politécnico de Leiria.

Apartado 4163, 2411-901 Leiria, Portugal
2152213@my.ipleiria.pt, joao.pereira@ipleiria.pt

² Grupo de Investigación en Modelos de Producción de Software, Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
Av. General Rumiñahui S/N, Sangolquí, Ecuador, Apartado 171-5-231B

dmmarcillo@espe.edu.ec

³ Instituto de Telecomunicações, Portugal

Abstract. This research is about how to create 3D model objects using an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). Our system is composed by a small drone that has Wi-Fi, a mini camera, and it can be controlled remotely by a smartphone. A smart network of Wi-Fi access points with directional and remote controlled antennas are utilized to determine the location of the mini drone, using the Angle of Arrival (AoA) method. By estimating its position, our mini UAV is able to follow automatically a planned route around an object. During its trajectory, our UAV takes automatically some photos that can be used to generate a 3D model using appropriate software.

Keywords: Localization system, UAV, Wi-Fi, Smart Antennas, 3D Scanner.

1 Introduction

With the increase of the population, there has been an increase in the demand of information regarding both inside and outside spaces through means of devices that rely on easy to use high end technology. One of such cases is the use of unmanned aerial vehicles (UAV) that work in an autonomous fashion in dynamic and complex environments. These conditions are a fundamental part in the planning of some applications, both civil and military, in which the localization of objects that are found around critical infrastructures is a priority [1], [2].

UAVs are characterized by their impressive speed associated with the capacity of being remotely controlled in dangerous zones. This type of vehicles have received an increasing interest from scientific research centers since they are used as low cost testbeds for robotic studies [9]. Just like the investigations [4], [5], [6], [7] mention, relevant challenges are mainly involved with the aerial communication system. However, some other drawbacks are the physical obstacles, the loss of quality of the connections with the increase of the communication

distances, the electronic limitations, the load weight, and battery life of the UAVs. Currently, the scientific community has deeply focused in the progress of aerial localization.

The objective of this work is to create an affordable UAV localization system through the means of smart Wi-Fi directional antennas. Our UAV is able to follow a planned route around an object and take some photos that are then used to create a 3D model of this object based on a 3D scanner application. The validation of our solution shows that it is a viable alternative to the costly traditional localization methods [4].

The rest of the article has been organized in the following way. The used technologies are exposed in section 2. Section 3 describes the theoretical model in which the UAVs localization system is based. Section 4 details the development of the software and the experimental design. In section 5 some results are presented. Finally, section 6 presents the conclusions and future work.

2 Implemented Technologies

UAVs, also known as drones, are remote controlled vehicles. This project will use a mini drone model Cheerson CX-10W (Fig. 3) of small dimensions with a camera with a resolution of 720 x 576 pixels and the ability to stream video and take photos with it. This drone distributes a Wi-Fi network and can be managed through a mobile application [8], [9]. From the photos taken by it, a 3D model can be generated. Fig. 2 shows an example of a 3D model generated from real photos using Autodesk ReMake [10].



Fig. 3. Drone CX-10W for the 3D scanner [8]



Fig. 4. 3D Model-ReMake [10]

The ESP8266 Wi-Fi module allows the reception and transmission of data wirelessly as well as the detection of signals transmitted by other networks. In this case, two modules have been used to perform different tasks [11]. Firstly, a model ESP8266-12E has been used to detect the signal transmitted by the drone. Secondly, a model ESP8266-01 transmits the data acquired to a central computer wirelessly. These modules are placed in Yagi antennas which are generally used in the field of radio frequency (RF) communications [14].

In this project, 3D printed Yagi antennas were used based on the model [13] which is used to increase the reception capacities of the ESP8266-12E when reading the Wi-Fi signal of the drone and to identify its position. The antenna rotates around a point with the help of servo motors (model SG90) and performs a sweep on a given area [14], detecting and calculating the angle at which the best signal is detected. With this information, the location of the drone can be calculated using the AoA technique.

In order to generate a 3D model, the UAV takes photos of the object and passes those pictures through a software designed for this specific task. Multiple services were tested and analyzed and the chosen solution was Autodesk ReMake [10]. The model is generated by selecting a set of images that are then sent to the cloud where the whole process happens [10]. When the generation finishes, the 3D model is then sent back to the user. From all the tested services, this was the one that provided the most accurate results and had the fastest process.

3 Design and Implementation

This chapter describes the technical design and implementation of the system. It was built to make it as autonomous as possible, while reducing the number of involved components and complexity.

3.1 System Design: Wi-Fi Localization and 3D Scanner

The Fig. 5 a) shows the architecture of our 3D localization system. It is composed by four main components: a centralized computer for control, a router with Wi-Fi, a drone with Wi-Fi and a set of sensing points (directional Wi-Fi antennas with servo motors). Each sensing point is comprised of two components: a Receiver (ESP-12E) and an Emitter (ESP-1). These two components are wired through a serial connection. This setup allows the guidance of the UAV through a predefined path around an object. The sensing points are responsible for locating the drone. This is done by having the Receivers connect to the network distributed by it and reading its Received Signal Strength Indication (RSSI) as they sweep the area. It also calculates the position at which the maximum RSSI is found. This information is then sent to the Emitter which redirects the data to the control computer through a Wi-Fi link.

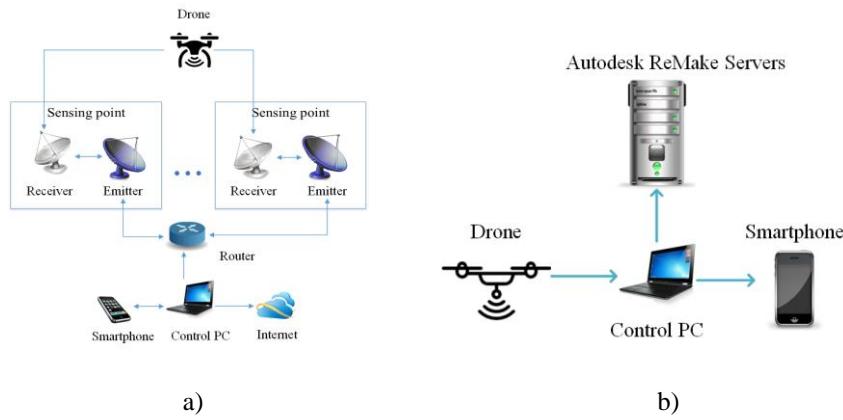


Fig. 5. Smart Wi-Fi localization system. a) System Architecture. b) 3D Scanner Architecture.

The whole process is managed in the central computer by a graphical Java application. Through this application, the user can define a set of waypoints, as well as their height, that define the route of the drone, the positions in which it should take photos, and the positions of the antennas and their Internet Protocol (IP) addresses. Here, the user can also select to which network the sensing points should connect since different UAVs have distinct Service Set Identifiers (SSIDs) for their networks.

The 3D scanner, of Fig. 5 b), refers to the whole process of generating a 3D model file of a physical object photographed by the drone. There are four components involved in this process:

a UAV, a computer, a smartphone and the photogrammetry service [15]. The Fig. 5 b) shows the architecture for this part of the system. A computer controls the whole process and it must be connected to the drone, so that it can control it, and must also be connected to a smartphone through a Universal Serial Bus (USB) port so that it can receive the photos. The use of the smartphone is necessary because there is no documentation about the video transmission protocol used by the Drone Cheerson CX-10W and reverse engineering yielded no positive results. As such, a simple Android application was developed to handle this process automatically which integrates directly with the mobile application used to fly this drone. With this, it is possible to send commands from the computer to the smartphone to let it know that a photo must be taken. The connection between these two components is performed using the Android Debug Bridge (ADB).

Since Autodesk ReMake is used, the computer must have the software installed and it must be connected to the Internet. The generation process requires user interaction since the photos must be selected and the operation started manually. The images are then sent to the 3D service where they are processed [10]. When the process finishes, the 3D model is sent back to computer and it is ready to use.

3.2 Implementation

Given the complexity of the developed solution, multiple components were involved in its implementation. Starting on the sensing points, they require the use of two Wi-Fi ESP8266 modules interconnected through a serial connection. Each module is responsible for a different task and must communicate between them. To guarantee that data is transmitted correctly and that they are aware of each other, a simple communication protocol was defined for this communication.

Starting by the Emitter, it is responsible for sending the data back to the computer and therefore, it must also have a Wi-Fi connection to it. Fig. 6 a) shows the flowchart of its operation. It starts by opening the serial connection to the Receiver, connecting automatically to the router and creating a User Datagram Protocol (UDP) server connection on port 80. It then waits for a client to send a packet and reads it. This packet contains the information about the network to which the Emitter should connect to. The data sent to the Emitter should have: 1) A string “OK”; 2) *The length of the string of the network name.* 3) *A string with the network name.* The text “OK” helps the Receiver detect when important information is coming from the serial connection, since the antenna module can send other information that is not controlled. Then, it sends the length of the network name in a single byte to tell how many bytes will be read next and after that, it sends the name of the network as a stream of bytes. Afterwards, the Emitter module enters in a loop waiting for data to come from the Receiver to then send it as UDP packets to the connected client.

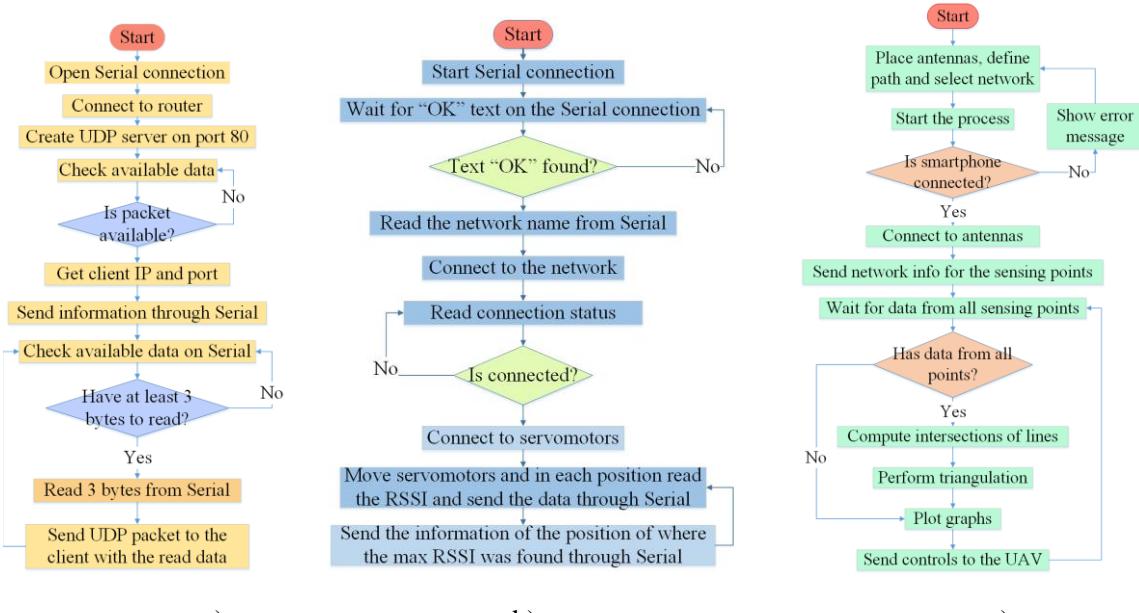


Fig. 6. Algorithms. a) Emitter operations flowchart. b) Receiver operations flowchart.
c) Application flowchart.

The Receiver is responsible for acquiring the Wi-Fi signal of the UAV and send it to the Emitter. To do that, it needs to know which network to connect. The Fig. 6 b) shows a flowchart of how the Receiver operates. When the antenna module boots, it first opens the serial connection to the Emitter and then listens to incoming data. It then enters in a loop until the text “OK” is found. Then, it reads the next byte which specifies the number of bytes to obtain next and reads that amount of bytes. This information forms the SSID of the Wi-Fi network. After receiving this information, the module makes the connection to it. This ESP8266 module enters in a loop until the connection is successful and, once connected, it moves the servo motors, both horizontally and vertically, and read the RSSI for each position while saving the maximum value found and the respective position. This data is then sent to the Emitter through the serial connection.

The whole operation is controlled by a graphical Java application developed using the Google Maps Application Programming Interface (API) [16]. Its process is described in Fig. 6 c). The user starts by defining the route for the UAV and the positions of the antennas, as well as their IP addresses and angles. After that, the user chooses the network to which the Receivers should connect and then starts the process. Once started, the application will try to connect to an Android smartphone and then, it connects to the ESP8266 modules and sends the network name information to each one of them. After performing all connections, the application waits for data from all sensing points and draws graphs with all the measurements that were made. When receiving the data from the sensing points, the position of the drone is estimated using the AoA technique. Based on the calculated position, its flight is adjusted. When the UAV reaches a position where it should take a photo, a command is sent to the smartphone. The photo is taken and then sent back to the computer. When the whole process finishes, the photos are then used to generate the 3D model.

4 Experimental Evaluation

To assess the quality of the developed solution, indoors tests were performed to have an understanding of the impacts caused by the multiple obstacles that are usually found inside buildings. A set of tests were performed on a small space of 3 x 3 meters forming a Cartesian plane which was used to manage the drone autonomously. Despite the indoors conditions, we found that the drone positioning estimations are clearly acceptable. The maximum estimation error is approximately 37 cm to the real location of the drone. The calculated distance between the centroid point of all measurements and the real position is only 5.7 cm. The average Euclidean distance error to the drone is of approximately 20 cm.



Fig. 7. 3D Model built on ReMake using the photos taken by our drone.

To validate the photogrammetry software, quick tests were performed with the camera of our Drone Cheerson CX-10W. Multiple solutions were assessed including MeshLab, 3DF Zephyr Pro, 3DSOM, 123D Catch and Autodesk ReMake. The only product that yielded acceptable results was Autodesk ReMake. Fig. 7 shows the 3D object generated by the photos that our Cheerson Drone took. The process of generating the 3D model with Autodesk ReMake took around 5 minutes.

One of the problems with the final result is that no information can be obtained regarding the size and scale of the generated model. This is a limitation of our solution that rises when, for example, using multiple models generated using this method which will not have their relative sizes correctly defined.

5 Conclusion and Future Work

The purpose of this work is to construct a novel 3D scanner implemented with a mini UAV that is controlled remotely by a Wi-Fi link and is able to drive autonomously around an object, taking some photos used to create a 3D object model. Smart Wi-Fi directional antennas with servo motors have been used to perform a precise localization of the drone around the object. Our results show us a maximum error of location estimation of the mini drone lower than 37 cm. The photos that have been taken by the drone have enough quality to generate a high quality 3D model.

Our future goal is to create a completely portable system that will perform 3D localization in larger open spaces. Furthermore, a system for managing the UAV through defined routes will be used to demonstrate a practical implementation of this project in a real environment. Finally,

it would be better to use a solution that generated the models locally and offline, removing the need of third party systems.

References

1. Tretyakov, V., Surmann, H. In: Hardware Architecture of a Four-Rotor UAV for USAR/WSAR scenarios. In Workshop Proceedings of SIMPAR, pp. 3-4. (2008).
2. Liu, Z., Chen, Y., Liu, B., Cao, C., Fu, X.: HAWK: an Unmanned Mini-Helicopter-Based Aerial Wireless kit for Localization. In: IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 13, pp. 287-298. IEEE, (2014).
3. Asadpour, M., Giustiniano, D., Hummel, K. A., Heimlicher, S.: Characterizing 802.11 n Aerial Communication. In Proceedings of the second ACM MobiHoc workshop on Airborne Networks and Communications, pp. 7-12. ACM, (2013).
4. Gu, Y., Zhou, M., Fu, S., Wan, Y.: Airborne WiFi Networks Through Directional Antennas: An Experimental study. In: IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp. 1314-1319. IEEE, (2015).
5. Johansen, T.A., Zolich, A., Hansen, T.: Unmanned Aerial Vehicle as Communication Relay for Autonomous Underwater Vehicle—Field Tests. In: IEEE Globecom Workshops, pp. 1469-1474. IEEE, (2014).
6. Rahman, M.A.: Enabling Drone Communications with WiMAX Technology. In: 5th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications, pp. 323-328. IEEE, (2014).
7. Asadpour, M., Van den Bergh, B., Giustiniano, D., Hummel, K.A., Pollin, S., Plattner, B.: Micro Aerial Vehicle Networks: An Experimental Analysis of Challenges and Opportunities. In: IEEE Communications Magazine, vol. 52, pp. 141-149. IEEE, (2014).
8. SelfiDrone, <http://selfidrone.com/product/2016-upslon-cx-10w-cx-10w-drone-drono-quadrocopter-rc-quadcopter-nano-wifi-drone-with-camera-720p-fpv-6axis-gyro-mini-drone-new/>. (2016).
9. First Quadcopter, Cheerson CX-10W Review, <http://www.firstquadcopter.com/quadcopter-reviews/cheerson-cx-10w-review/>. (2016).
10. Autodesk Remake, <https://remake.autodesk.com/about>. (2015).
11. Patel, K.K., Patoliya, J., Patel, H.: Low Cost Home Automation with ESP8266 and Lightweight protocol MQTT. In: Transactions on Engineering and Sciences, vol. 3. (2015).
12. Kaneda, N., Deal, W.R., Qian, Y., Wterhouse, R., Itoh, T.: A broadband planar quasi-Yagi antenna. In: IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol 50, pp. 1158-1160. (2002).
13. Directional YAGI WLAN Antenna Extension for 2.4GHz, <http://www.thingiverse.com/thing:19548>. (2012).
14. Krishnan, R.: Selection Criteria for Servo Motor Drives. In: IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 2, pp. 270-275. (1987).
15. Linder, W.: Digital photogrammetry: theory and applications. In: Springer Science &Business Media, (2013).
16. Google Maps APIs, <https://developers.google.com/maps/>. (2016).