

ANÁLISIS DE LA EXACTITUD DEL POSICIONAMIENTO EN INTERIORES EMPLEANDO ZIGBEE



Universidad
del Cauca

Trabajo de Grado – Modalidad Trabajo de Investigación

Johan Leonardo Cerón Gómez

Laura Isabel Muñoz López

Director: Mag. Víctor Fabián Miramá Pérez

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

GRIAL- Grupo de Radio e Inalámbricas

Sistemas de Comunicaciones Móviles e Inalámbricas

Popayán, Cauca

2021

ANÁLISIS DE LA EXACTITUD DEL POSICIONAMIENTO EN INTERIORES EMPLEANDO ZIGBEE



Universidad
del Cauca

Trabajo de Grado - Modalidad Trabajo de Investigación

Johan Leonardo Cerón Gómez

Laura Isabel Muñoz López

Director: Mag. Víctor Fabián Miramá Pérez

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

GRIAL- Grupo de Radio e Inalámbricas

Sistemas de Comunicaciones Móviles e Inalámbricas

Popayán, Cauca

2021

Tabla de contenido

Lista de Tablas	v
Lista de Figuras.....	v
Lista de Acrónimos	vii
Introducción.....	1
1. CAPÍTULO I: CONCEPTOS GENERALES.....	2
1.1 Posicionamiento.....	2
1.2 Posicionamiento en interiores.....	2
1.3 Aplicaciones.....	4
1.4 Requisitos de un sistema de posicionamiento para interiores	5
1.5 Tecnologías para posicionamiento	6
1.6 Descripción de la tecnología ZigBee.....	10
2. CAPÍTULO II: TÉCNICAS Y MÉTRICAS DE POSICIONAMIENTO.....	14
2.1 Técnicas de posicionamiento.....	14
2.2 Métricas de posicionamiento	22
3. CAPÍTULO III: SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA INTERIORES EMPLEANDO ZIGBEE	31
3.1 Requisitos	32
3.2 Análisis y diseño	32
3.3 Implementación.....	38
3.4 Evaluación del desempeño.....	56
4. CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	86
4.1 Conclusiones	86
4.2 Trabajos futuros.....	88

Lista de Tablas

Tabla 1: Tecnologías de Posicionamiento.....	3
Tabla 2: Ventajas y desventajas de la tecnología Wi-Fi.....	7
Tabla 3: Ventajas y desventajas de la tecnología Bluetooth.....	7
Tabla 4: Ventajas y desventajas de la tecnología UWB.....	7
Tabla 5: Ventajas y desventajas de la tecnología RFID.....	8
Tabla 6: Ventajas y desventajas de la tecnología ZigBee.....	8
Tabla 7: Características de tecnologías de RF [17] [18].....	9
Tabla 8: Bandas de frecuencia de ZigBee.....	11
Tabla 9: Módulos de la familia XBee [21].....	13
Tabla 10: Comparación entre las técnicas de posicionamiento.....	34
Tabla 11: Comparación entre las métricas de posicionamiento.....	35
Tabla 12: Comparación entre las series de los módulos XBee [21].....	36
Tabla 13: Descripción de trama API.....	43
Tabla 14: Cálculo de distancias variando n.....	48
Tabla 15: Calibración para número de muestras.....	51
Tabla 16: Calibración para tipo de muestras.....	52
Tabla 17: Calibración para altura de dispositivos.....	53
Tabla 18: Calibración de disposiciones de antenas.....	54
Tabla 19: resultados variando nodos referencia.....	55
Tabla 20: Descripción de escenarios.....	56
Tabla 21: Resultados para prueba P1.1.....	60
Tabla 22: Resultados para prueba P1.2.....	64
Tabla 23: Resultados para prueba P2.1.....	69
Tabla 24: Resultados para prueba P2.2.....	73
Tabla 25: Resultados para prueba P2.3.....	76
Tabla 26: Resultados sobre escenarios cerrados.....	78
Tabla 27: Resultados PDF para prueba P3.1.....	84

Lista de Figuras

Figura 1: Tecnología en interiores en función de la exactitud y la cobertura [7].	3
Figura 2: Tecnología en interiores en función de la exactitud y longitud de onda [7].	4
Figura 3: Parámetros principales de un sistema de posicionamiento.....	5
Figura 4: Pila de protocolos ZigBee.....	10
Figura 5: Módulo XBee [20].....	12
Figura 6: Localización basada en celda de origen.....	15
Figura 7: Trilateración para 2D.....	16
Figura 8: Trilateración basada en centroide.....	17
Figura 9: Angulación para 2D.....	18
Figura 10: Fase off-line.....	21
Figura 11: Fase online.....	21
Figura 12: Conformación de la distancia mediante ToA.....	23
Figura 13: Ejemplo de ToA con tres nodos.....	24
Figura 14: Medición de TDoA.....	25

Figura 15: Localización de un ND mediante tres NR.....	25
Figura 16: Ejemplo de AoA.....	26
Figura 17: Ejemplo de PoA.....	27
Figura 18: Mecanismo RTS/CTS.....	28
Figura 19: Cálculo de RTT.	28
Figura 20: Ciclo de vida de metodología RUP.....	31
Figura 21: Diagrama en bloques del modelo general de geolocalización.....	32
Figura 22: Diagrama general del sistema de posicionamiento en interiores en ZigBee.....	33
Figura 23: Diagrama de flujo general para el sistema de posicionamiento.	33
Figura 24: Componentes del nodo destino.....	39
Figura 25: Nodo Destino.....	40
Figura 26: Componentes del nodo referencia.	40
Figura 27: Nodo Referencia.	41
Figura 28: Diseño general del nodo procesamiento.	41
Figura 29: Conexión entre Arduino uno y XBee ZB S2C.....	42
Figura 30: Trama obtenida con valor RSSI.	43
Figura 31: Tramas API a diferentes distancias.....	43
Figura 32: Diagrama de flujo para obtener valor RSSI de una trama API.	44
Figura 33: Valor RSSI de una trama API.....	45
Figura 34: Diseño general del sistema de posicionamiento empleando ZigBee.	45
Figura 35: Pruebas iniciales del sistema.	46
Figura 36: Calibración para valor de A.	47
Figura 37: Estimación del valor de n.	47
Figura 38: Error de medición en prueba de variación de n.....	48
Figura 39: Calibración de n para una esquina.....	49
Figura 40: Calibración de n para las 4 esquinas del entorno.....	50
Figura 41: Análisis de factor de atenuación.....	50
Figura 42: Disposición de antena.	54
Figura 43: Calibración ubicación de nodos referencia.....	55
Figura 44: Escenario ESC1.	57
Figura 45: Distribución de puntos para primer escenario.	58
Figura 46: Resultados de la prueba P1.1 en escenario ESC1.	58
Figura 47: Mapa de calor para prueba P1.1 en escenario ESC1.	59
Figura 48: Función de Densidad de Probabilidad (PDF) para resultados de prueba P1.1.....	60
Figura 49: Función de Distribución Acumulativa (CDF) para prueba P1.1.	61
Figura 50: Test chi-cuadrado para P1.1.	61
Figura 51: Probabilidades de error para análisis de exactitud prueba P1.1.	62
Figura 52: Resultados de la prueba P1.2 en escenario ESC1.	63
Figura 53: Mapa de calor para prueba P1.2 en escenario ESC1.	63
Figura 54: PDF para prueba P1.2.	64
Figura 55: Probabilidades de error para análisis de exactitud prueba P1.2.	65
Figura 56: Resultados de la prueba P1.3 en escenario ESC1.	65
Figura 57: Mapa de calor para prueba P1.3 en escenario ESC1.	66
Figura 58: PDF para prueba P1.3.	66
Figura 59: Probabilidades de error para análisis de exactitud prueba P1.3.	67

Figura 60: Escenario ESC2.	67
Figura 61: Distribución de puntos para ESC2.	68
Figura 62: Resultados de la prueba P2.1 en escenario ESC2.	68
Figura 63: Mapa de calor para prueba P2.1 en escenario ESC2.	69
Figura 64: PDF para prueba P2.1.	70
Figura 65: CDF para la prueba P2.1	70
Figura 66: Test chi-cuadrado para P2.1.	71
Figura 67: Probabilidades de error para análisis de exactitud prueba P2.1.	72
Figura 68: Resultados de la prueba P2.2 en escenario ESC2.	72
Figura 69: Mapa de calor para prueba P2.2 en escenario ESC2.	73
Figura 70: PDF para prueba P2.1.	74
Figura 71: Probabilidades de error para análisis de exactitud prueba P2.2.	74
Figura 72: Resultados de la prueba P2.3 en escenario ESC2.	75
Figura 73: Mapa de calor para prueba P2.3 en escenario ESC2.	75
Figura 74: PDF para prueba P2.3.	76
Figura 75: Probabilidades de error para análisis de exactitud prueba P2.3.	77
Figura 76: Comparación entre resultados prueba P1.3.	79
Figura 77: Comparación entre PDF prueba P1.3.	79
Figura 78: Comparación CDF prueba P1.3.	80
Figura 79: Comparación entre resultados prueba P2.3.	80
Figura 80: Comparación PDF prueba P2.3.	81
Figura 81: Comparación CDF prueba P2.3.	81
Figura 82: Escenario ESC3.	82
Figura 83: Distribución de puntos sobre escenario ESC3.	83
Figura 84: Resultados de la prueba P3.1 en escenario semiabierto.	83
Figura 85: Mapa de calor escenario semiabierto.	84
Figura 86: PDF para prueba P3.1.	84
Figura 87: Probabilidades de error para análisis de exactitud prueba P3.1.	85

Lista de Acrónimos

AAL: *Ambient Assistant Living*, Vida asistida por el ambiente.

ACK: *Acknowledgement*, Acuse de recibo.

AOA: *Angle Of Arrival*, Ángulo de Llegada.

BLE: *Bluetooth Low Energy*, Bluetooth de Baja Energía.

CTS: *Clear To Send*, Listo para Enviar.

GLONASS: *Global Navigation Satellite System*, Sistema Global de Navegación por Satélite.

GNSS: *Global Navigation Satellite System*, Sistema Global de Navegación por Satélite.

GPS: *Global Positioning System*, Sistema de Posicionamiento Global.

IBM: *International Business Machines Corporation*, Corporación Internacional de Máquinas de Negocios.

IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

IOT: *Internet of Things*, Internet de las Cosas.

JCGM: *Joint Committee for Guides in Metrology*, Comité Conjunto de Guías en Metrología.

LBS: *Location Based Services*, Servicios Basados en Localización.

LORAN: *Long Range Navigation*, Navegación de Largo Alcance.

LOS: *Line of Sight*, Línea de Vista.

LSE: *Least Square Estimation*, Estimación por Mínimos Cuadrados.

MEO: *Medium Earth Orbit*, Órbita Media Terrestre.

NLOS: *Non Line of Sight*, Sin Línea de Vista.

RFID: *Radio Frequency Identification*, Identificación por Radiofrecuencia.

RSS: *Received Signal Strength*, Intensidad de la Señal Recibida.

RSSI: *Received Signal Strength Indicator*, Indicador de la Intensidad de la Señal Recibida.

RTS: *Request To Send*, Solicitud de Envío.

RTT: *Round Trip Time*, Tiempo de Ida y Vuelta.

SIFS: *Short Interframe Space*, Espacio Corto entre Tramas.

TDOA: *Time Difference Of Arrival*, Diferencia entre los Tiempos de Llegada.

TOA: *Time of Arrival*, Tiempo de Llegada.

UHF: *Ultra High Frequency*, Frecuencia Ultra Alta.

UWB: *Ultra Wide Band*, Banda Ultra Ancha.

VHF: *Very High Frequency*, Frecuencia Muy Alta

WI-FI: *Wireless Fidelity*, Fidelidad Inalámbrica.

WLAN: *Wireless Local Area Network*, Red de Área Local Inalámbrica.

WPAN: *Wireless Personal Area Network*, Red de Área Personal Inalámbrica.

XCTU: *XBee Configuration Test Utility*, Utilidad de Prueba y Configuración XBee.



Introducción

En la actualidad, los sistemas de posicionamiento brindan una solución robusta y eficaz para la geolocalización de personas, objetos o lugares. La característica fundamental de estos sistemas es determinar la posición de cualquier usuario u objeto con el mayor grado de exactitud. Con el nacimiento del GPS surgió la oportunidad de conocer la ubicación de alguien o algo en tiempo real, ocasionando un crecimiento en áreas como la militar, domótica, transporte, entre otras. El sistema GPS permite determinar una posición en tres dimensiones: longitud, latitud y altitud, enviando señales radio a receptores en la superficie de la tierra [1].

Las características principales de los sistemas de posicionamiento son la exactitud, precisión y la fidelidad, sin embargo, estos sistemas presentan limitaciones en la frecuencia y potencia de las señales que emplean, éstas no pueden traspasar objetos como paredes, árboles y edificios, produciendo interferencia entre el satélite y el dispositivo receptor, generando pérdidas en la información transmitida [2]. Por lo cual se están desarrollando mecanismos de posicionamiento que estimen la posición en interiores, con un margen de error menor al obtenido por sistemas para exteriores. Se han implementado diferentes sistemas basados en radiofrecuencia, infrarrojo, visión artificial y ultrasonido, destacando las tecnologías que se basan en RF, como Wi-Fi, Bluetooth, RFID, BLE, UWB y ZigBee [3].

ZigBee es una tecnología inalámbrica que se caracteriza por su bajo consumo de energía y bajo costo, su rango de cobertura varía entre los 10 y 75 m, permitiendo una conexión segura de extremo a extremo. Se compone de 3 tipos de nodos, el nodo coordinador que se encarga de supervisar la red y puede establecer comunicación con otras redes, el nodo router que se encarga de distribuir la información y el nodo final o nodo a localizar [3].

El presente trabajo tiene como propósito diseñar e implementar un sistema de posicionamiento que emplee ZigBee, seleccionando la técnica y métrica que se ajusten a la tecnología, se busca realizar un análisis para determinar el grado de exactitud que presenta en escenarios cerrados. El documento está conformado por cuatro capítulos, en el capítulo inicial se realiza una revisión bibliográfica de los diferentes temas que se abordan en el trabajo de grado, el segundo capítulo describe las técnicas y métricas más utilizadas, el tercer capítulo desarrolla el sistema propuesto, finalmente el último capítulo presenta las conclusiones y propone posibles trabajos futuros.



1. CAPÍTULO I: CONCEPTOS GENERALES

1.1 Posicionamiento

Es el proceso que permite identificar de manera exacta o aproximada la ubicación de una persona u objeto por medio del uso de herramientas como sistemas de posicionamiento, sin embargo, las señales transmitidas sufren atenuaciones que afectan la calidad de la señal recibida, debido a que no pueden traspasar objetos como paredes, árboles y edificios, generando pérdidas en la información transmitida. Debido a lo anterior se están desarrollando investigaciones en tecnologías de posicionamiento para estimar una posición en escenarios interiores con un margen de error menor al obtenido por sistemas para exteriores [1].

1.2 Posicionamiento en interiores

El posicionamiento en interiores permite conocer la posición de una persona u objeto dentro de una estructura cubierta; se utiliza para localizar personas u objetos en grandes edificios y espacios cerrados [2]. La ubicación en interiores se ha convertido en un gran desafío, en el que se debe tener en cuenta el multiproyecto, los obstáculos que debe traspasar la señal, la No Línea de Vista (NLOS, *Non Line of Sight*), para lo cual se han requerido de grandes esfuerzos por parte del sector académico y empresarial para superar estas limitaciones y obtener una información de posición adecuada. En escenarios interiores existen condiciones que facilitan la implementación de sistemas de localización, así como las áreas de cobertura, la poca influencia de condiciones climáticas, la existencia de infraestructura apropiada para la operación del sistema, como electricidad, acceso a Internet, entre otros [3].

En la actualidad se están desarrollando diferentes tecnologías para la implementación de sistemas de posicionamiento en interiores, cada una brinda unas características específicas que aportan ventajas y desventajas según los requisitos del usuario, en la Tabla 1 se especifican algunas características de los sistemas desarrollados [4]. Además, en la Figura 1 se presenta la relación entre cobertura y exactitud de algunos sistemas de posicionamiento.



Tabla 1: Tecnologías de Posicionamiento.

Tecnología	Rango de exactitud	Cobertura (m)	Principios de medición	Aplicaciones
Cámaras	mm-dm	1-10	Mediciones de ángulos de imágenes	Navegación, robótica, metrología
Infrarrojo	cm-m	1-5	Imagen térmica	Detección, rastreo
Sistemas polares	cm-m	3-2000	Mecánico, interferómetro	Metrología
Sonido	cm	2-10	Tiempo de llegada	Seguimiento
WLAN/WI-FI	m	20-50	<i>Fingerprinting</i>	Navegación para peatones
RFID	dm-m	1-50	Detección de proximidad, <i>Fingerprinting</i>	Navegación para peatones
UWB	cm-m	1-50	Tiempo de llegada	Robótica automatizada
GNSS de alta sensibilidad	10m	Global	Tiempo de llegada	Servicios basados en localización
Navegación inercial	1%	10-100	Tiempo de llegada	Navegación para peatones
Sistemas magnéticos	mm-cm	1-20	<i>Fingerprinting</i>	Trabajo en minas
Otras tecnologías	m	10-1000	<i>Fingerprinting</i> , detección de proximidad	Rastreo de personas u objetos

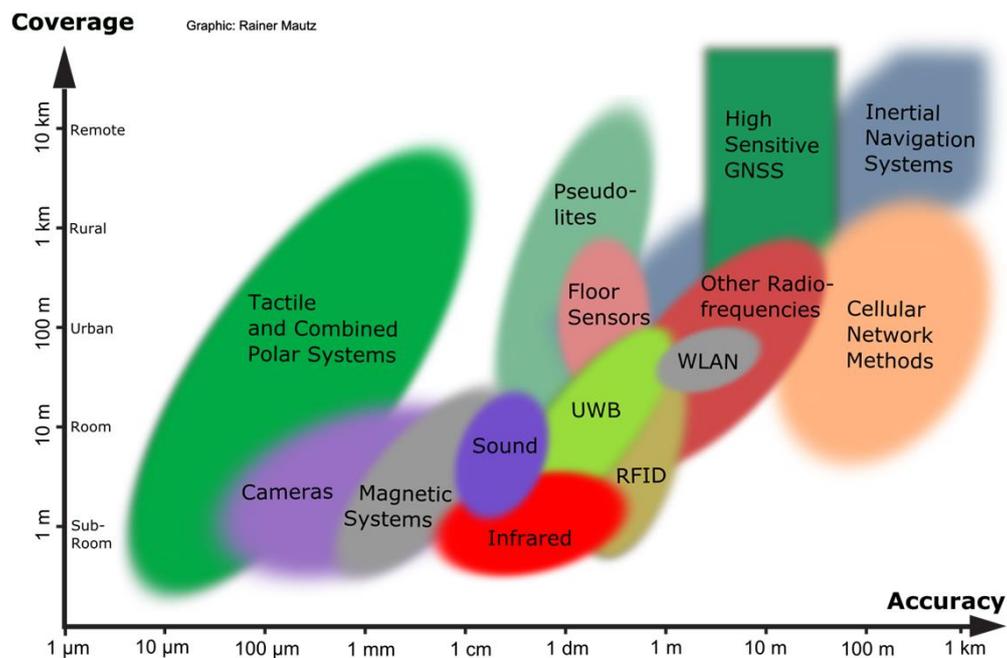


Figura 1: Tecnología en interiores en función de la exactitud y la cobertura [7].



En la Figura 2 se evidencia que la mayoría de las tecnologías usadas para los sistemas de posicionamiento se basan en ondas electromagnéticas y unas pocas en ondas mecánicas, como las ondas de sonido, lo cual permite aprovechar gran parte del espectro electromagnético [3].

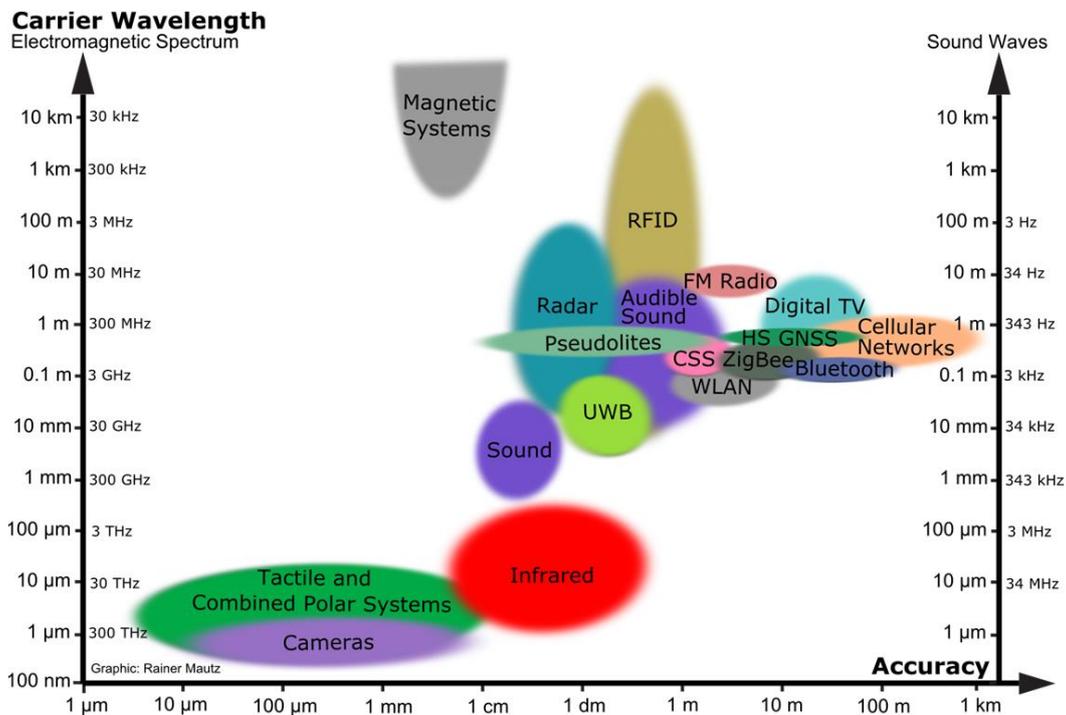


Figura 2: Tecnología en interiores en función de la exactitud y longitud de onda [7].

1.3 Aplicaciones

Gracias a investigaciones realizadas en el área de posicionamiento en interiores se están desarrollando aplicaciones que facilitan las tareas que realiza el ser humano como:

- El hogar, incrementa el nivel de seguridad del escenario.
- Servicio médico, ayuda en la localización del personal médico en situaciones de emergencia, control de pacientes y equipos, usada también en asistencia robótica durante procedimientos quirúrgicos.
- Transporte, ayuda en el monitoreo y control del funcionamiento de vehículos autónomos.
- Civiles, posibilita la detección de la ubicación de bomberos en un edificio en llamas, el seguimiento de perros entrenados para buscar explosivos y localización de personas u objetos en catástrofes naturales.
- Computación ubicua, metrología industrial, arquitectura, arqueología e ingeniería civil [5].



1.4 Requisitos de un sistema de posicionamiento para interiores

Los sistemas de posicionamiento para interiores deben satisfacer algunas necesidades básicas como bajo costo, baja potencia, baja latencia, dispositivos de tamaño reducido, poco mantenimiento e infraestructura limitada. En la Figura 3 se muestran los parámetros de desempeño que se deben tener en cuenta en los sistemas de posicionamiento en interiores.



Figura 3: Parámetros principales de un sistema de posicionamiento.

A continuación, se describen algunos de los parámetros más importantes para la conformación y desarrollo de los sistemas de posicionamiento en interiores.

- **Exactitud**

Grado de conformidad o error de medición de la distancia euclidiana de una posición estimada o medida en un momento dado, con respecto a la posición real. Se requiere para un sistema de localización en interiores de una exactitud menor o igual a 1 metro [6], este valor se tomará como referencia para evaluar el desempeño del presente trabajo de grado [7].

- **Cobertura**

Área geográfica en la que existe un nivel de potencia mayor a un valor de umbral [7].

- **Fiabilidad**

La fiabilidad es el grado de confianza que brinda un sistema de posicionamiento en interiores, tomando como referencia la probabilidad que una falla ocasione un mal funcionamiento de dicho sistema [8].

- **Disponibilidad**

La disponibilidad de un sistema de posicionamiento es el porcentaje de tiempo durante el cual el servicio está disponible con una exactitud y una fiabilidad



adecuadas. Este puede ser afectado por factores como fallas de dispositivos, obstrucción o retardos [9].

- **Latencia del sistema**

La latencia de un sistema de posicionamiento es el retardo con el que la información requerida está disponible para el sistema, requiere de un alto nivel de procesamiento [9].

- **Costos**

El costo de un sistema de posicionamiento depende de factores tales como, dinero, tiempo, espacio, peso y energía. Además, se debe tener en cuenta los gastos directos e indirectos necesarios para el desarrollo de dicho sistema, lo cual incluye gastos de monitoreo o soporte [7].

- **Frecuencia de actualización**

La frecuencia de actualización de un sistema de posicionamiento consiste en el número de repeticiones por unidad de tiempo con la cual se calculan las posiciones en el dispositivo controlador [10].

- **Seguridad y protección**

Permite protección contra posibles eventos no deseados o fallas, como la vulneración de privacidad, robo o alteración de la información [10].

- **Precisión**

Grado de proximidad de las muestras tomadas o de los valores medidos entre si bajo condiciones específicas [10].

1.5 Tecnologías para posicionamiento

Los escenarios interiores presentan limitaciones como la velocidad de transmisión, la reflexión de la señal, el multitrayecto, la gestión del espectro y la cobertura, por lo cual se han realizado investigaciones para superar estos factores. Se busca que todos los usuarios obtengan información lo más exacta posible de su posición o la de un objeto. Se han implementado sistemas que logran un buen desempeño en interiores basados en las tecnologías de Infrarrojo (IR, *Infrared*), Visión Artificial (AV, *Artificial Vision*), Ultrasonido (US, *Ultrasound*) y Radiofrecuencia (RF, *Radio Frequency*), la selección de la tecnología se rige por las necesidades del usuario [11], destacando las tecnologías RF ya que brindan comunicaciones más estables y confiables. Las tecnologías basadas en radiofrecuencia más utilizadas se describen brevemente a continuación.

1.5.1 Wi-Fi

Basada en Redes Inalámbricas de Área Local (WLAN, *Wireless Local Area Network*), pertenece al estándar IEEE 802.11 y opera en las bandas de frecuencia 2,4 GHz y 5 GHz. Las redes WLAN han tenido gran aceptación en entornos empresariales, residenciales, comerciales y académicos. En la Tabla 2 se muestran algunas de las ventajas y desventajas de la tecnología Wi-Fi [12].



Tabla 2: Ventajas y desventajas de la tecnología Wi-Fi.

Ventajas	Desventajas
Bajo costo	Menor velocidad que una red cableada
Enlace con alta velocidad de transmisión de datos	Corto alcance
Intuitivo	Baja seguridad
No requiere Línea de vista	Problemas por multitrayecto
Emplea infraestructura disponible	Alta interferencia

1.5.2 Bluetooth

Es una tecnología inalámbrica de corto alcance que pertenece a las tecnologías de Red Inalámbrica de Área Personal (WPAN, *Wireless Personal Area Network*), con baja potencia por lo cual su rango de alcance entre dispositivos digitales se encuentra en un radio de 10 a 100 m. Está tecnología es definida por el estándar IEEE 802.15 en el que se definen características como el alcance, la velocidad, potencia, clase y frecuencia. Bluetooth posibilita las conexiones no cableadas facilitando la interconexión entre equipos aún sin tener Línea de Vista (LOS, *Line of Sight*) entre ellos. Esta tecnología presenta ventajas y desventajas, las cuales se presentan en la Tabla 3 [13].

Tabla 3: Ventajas y desventajas de la tecnología Bluetooth.

Ventajas	Desventajas
Altamente ubicuo	Alcance limitado
Integrado en la mayoría de los dispositivos móviles	Bajo nivel de seguridad
Bajo consumo de energía	Velocidad de transmisión limitada
No requiere de línea de vista	

1.5.3 UWB

La tecnología de Banda Ultra Ancha (UWB, *Ultra Wide-Band*) se caracteriza por emplear bajos niveles de potencia lo cual hace que su rango de alcance sea corto, además, causan baja interferencia en los sistemas de radio frecuencia con banda estrecha debido a su baja densidad espectral de potencia. En la Tabla 4 se muestran las ventajas y desventajas más representativas de esta tecnología [14].

Tabla 4: Ventajas y desventajas de la tecnología UWB.

Ventajas	Desventajas
Bajo consumo	Corto alcance
Reusó de espectro	Baja implementación en el mercado



Alta productividad	Requiere de varios receptores
Gran ancho de banda	

1.5.4 RFID

La Identificación por Radiofrecuencia (RFID, *Radio Frequency Identification*) es una tecnología inalámbrica que opera entre las bandas de muy alta frecuencia (VHF, *Very High Frequency*) y de Ultra Alta Frecuencia (UHF, *Ultra High Frequency*). Se emplea en la identificación de personas u objetos, pudiendo lograr una exactitud de 1m [15]. La tecnología usa etiquetas o transpondedores y un lector para enviar información en forma de ondas electromagnéticas. Las etiquetas de RFID están disponibles en diferentes tamaños, su elección depende de la aplicación y el escenario, las etiquetas pueden ser activas o pasivas. Una de las principales diferencias entre ellas, es la fuente de energía que tiene y con ello su alcance, las pasivas al no tener una fuente de energía constante tienen un rango de cobertura menor que las activas [16]. En la Tabla 5 se muestran algunas ventajas y desventajas que tiene la tecnología RFID.

Tabla 5: Ventajas y desventajas de la tecnología RFID.

Ventajas	Desventajas
Servicio inalámbrico	Corto alcance
No requiere de línea de vista	Almacenamiento limitado
Trazabilidad individual	Tipo de etiqueta
Bajo ruido	Alto costo

1.5.5 ZigBee

Es una tecnología inalámbrica conformada por 3 tipos de nodos: coordinador, que supervisa la red y permite establecer comunicación con otras redes; el Router ZigBee el cual distribuye la información y posibilita la ejecución del código a el usuario; y por último los dispositivos finales que permiten la comunicación con el nodo coordinador, pero no hacia otros dispositivos [12]; su estructura está definida por el estándar IEEE 802.15.4 y ZigBee Alliance. En la Tabla 6 se muestran los aspectos más relevantes de esta tecnología.

Tabla 6: Ventajas y desventajas de la tecnología ZigBee.

Ventajas	Desventajas
Costo de producción	Velocidad de transmisión de datos
Nivel de radiación	Cobertura
Nivel de energía	Textos pequeños



1.5.6 Comparación entre tecnologías

En la tabla 7 se muestran las características más representativas de las tecnologías Wi-Fi, Bluetooth, UWB, RFID y ZigBee, como su complejidad, número de nodos, latencia, seguridad, tiempo de vida de la batería, esto permite observar el comportamiento de dichas tecnologías y seleccionar la que mejor se adapta a los requisitos del usuario.

Tabla 7: Características de tecnologías de RF [17] [18].

Características	Wi-Fi	Bluetooth	UWB	RFID	ZigBee
Complejidad	Muy complejo	Complejo	Muy complejo	Sencillo	Sencillo
Número de nodos	32	8	8	595	65535
Latencia	3 s	10 s	10 ms	1 ms	30 ms
Distancia	100 m	10 m	10-20 m	10cm- 1m	70-300m
Velocidad de datos	11 Mbps	1 Mbps	110 Mbps	480 Mbps	0,25 Mbps
Seguridad o encriptación	<i>Authentication Service Set ID(SSID)</i>	64 bit, 128 bit	AES, CTR	AES	128-bit, <i>Advanced Encryption Standard (AES)</i>
Vida de batería	Horas	Días	Años	Años	Años
Consumo de energía	aprox. 1-3 A	400mA(transmitiendo) 20mA(reposo)	227,3 mA	0,3 μ A	30mA(transmitiendo) 3 μ A(reposo)
Banda de frecuencia	2,4-5 GHz	2,4 GHz	3,1-10,6 GHz	868 Mhz-2,4Ghz	2,4 GHz, 868/915 MHz
Canales	14	79	4	25	16(2,4 GHz) 10(915 MHz) 1(868 MHz)
Precio	Accesible	Accesible	Alto	Accesible	Bajo
Potencia	15 mW	100 mW	6 mW	4 mW	1 mW



1.6 Descripción de la tecnología ZigBee

ZigBee es una tecnología inalámbrica desarrollada en conjunto por IEEE y ZigBee Alliance, la cual está enfocada en la implementación de dispositivos embebidos para automatización de hogares y edificios, control industrial, entre otros. Su pila de protocolos está basada en el modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open System Interconnection*) [19], como se muestra en la Figura 4, en la cual dos de sus niveles, la capa de nivel físico y la capa de acceso a el medio están definidas por el estándar 802.15.4 [20], mientras que, las capas restantes están descritas por *ZigBee Alliance*, las cuales se encargan del enrutamiento de los datos entre los nodos de la red y la presentación de información para que el usuario interactúe con el sistema; de esta manera se complementan los estándares IEEE y ZigBee [19].

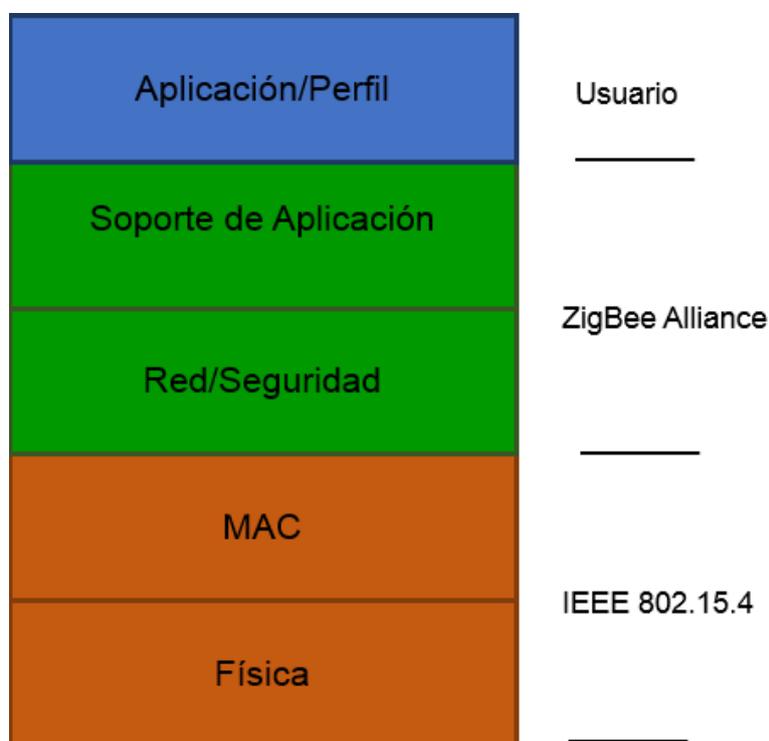


Figura 4: Pila de protocolos ZigBee.

El estándar IEEE 802.15.4 define dos tipos de dispositivos de red:

- Dispositivo de Función Completa (FFD, *Full Function Device*): tiene la funcionalidad de actuar como coordinador de la red, enrutador de datos o un dispositivo final, se encuentra activo permanentemente [19].
- Dispositivo de Función Reducida (RFD, *Reduced Function Device*): actúa como sensor de la red, con un bajo consumo de energía. El dispositivo se activa cuando es requerido y en ese instante envía datos a un FFD. Dispositivos utilizados en aplicaciones muy sencillas, como interruptores de iluminación y sensores infrarrojos [19].



1.6.1 Capa física (PHY)

Encargada de la transmisión y recepción de datos mediante un canal radio, empleando técnicas de espectro ensanchado (*spreading spectrum*), en la Tabla 8 se observan las 3 bandas de frecuencia en las que trabaja ZigBee:

- La banda de 2,4 GHz: de uso global, 16 canales disponibles (Industrial, Médica y Científica) con una velocidad de transmisión de datos de 20 Kbps [9].
- La Banda de 915 GHz emplea 10 canales con una tasa de 40 Kbps perteneciente a América [9].
- La banda de 868 GHz con un único canal, de uso europeo y una tasa de 250 Kbps. Esta capa se encarga de realizar una detección de energía en el receptor, indicar la calidad del enlace, evaluar el estado del canal, la transmisión y la recepción de datos [9].

Tabla 8: Bandas de frecuencia de ZigBee.

PHY(MHz)	Frecuencia (MHz)	Número de canales	Modulación	Velocidad de transmisión (Kbps)
868	868-868,6	1	BPSK	20
915	902-928	1-10	BPSK	40
2400	2400-2483,5	11-26	OPSK-QPSK	250

1.6.2 Capa de Control de Acceso al Medio (MAC)

Es la capa que permite el enlace de datos, transmite los paquetes, valida las tramas recibidas, comprueba errores en transmisión y confirma la recepción de tramas al emisor. También, se encarga de fragmentar los paquetes, controlar el flujo y la velocidad de transmisión. Esta capa se caracteriza por controlar el medio de comunicación compartido por una serie de dispositivos que se comunican a través de él [9].

1.6.3 Capa de red (NTW)

Esta capa es la responsable de crear una red y asignar direcciones a los dispositivos. Aquí es donde se implementan las diferentes topologías que soporta ZigBee (árbol, estrella y malla). En esta capa se ubican los métodos necesarios para iniciar la red, enviar paquetes dirigidos a otros nodos, proporcionar los medios para garantizar la entrega del paquete al destinatario final, filtrar paquetes recibidos, cifrarlos y autenticarlos [9].

1.6.4 Capa de seguridad

Esta capa proporciona cifrado utilizando claves de 128 bits para una transmisión de datos segura. Esta capa permite distintos niveles de seguridad dependiendo de las necesidades de la red y soporta el uso de claves preinstaladas (fijadas en el proceso



de desarrollo) y de claves transportadas (generadas en tiempo real en el momento de la conexión entre dispositivos) [9].

1.6.5 Capa de aplicación

Consta de dos subcapas

- Soporte de Aplicación (APS): Es la encargada de mantener el rol del nodo en la red, filtrar paquetes a nivel de aplicación, conservar la relación de diferentes dispositivos con los que la aplicación interactúa y simplificar el envío de datos a los diferentes nodos de la red [9].
- Entorno de Aplicación (AF): Esta subcapa se divide nuevamente en objetos para dispositivos ZigBee, que se encargan de definir el rol de cada dispositivo o nodo en la red (coordinador, referencia y destino), y los objetos definidos por el diseñador de red [9].

1.7 Dispositivos ZigBee

Los módulos de comunicación por radiofrecuencia basados en el estándar IEEE 802.15.4 y ZigBee son fabricados por diferentes compañías dedicadas a la elaboración de chips y microcontroladores para IoT. Digi es uno de los fabricantes de mayor importancia en este sector, el cual creó la línea XBee que suministra soluciones para comunicaciones inalámbricas mediante RF. Digi proporciona dispositivos simples, confiables, versátiles, seguros, escalables y con una completa gama de herramientas y recursos de apoyo [20].

En la Figura 5 se puede observar el modelo general de los dispositivos de la familia XBee, los cuales cuentan con 20 pines que tienen distintas funciones y varían dependiendo del modelo y la serie. Estos módulos pueden ser empleados con un número limitado de conexiones, basta con utilizar los pines Vcc, Gnd, Tx y Rx para que funcionen de forma correcta [20].

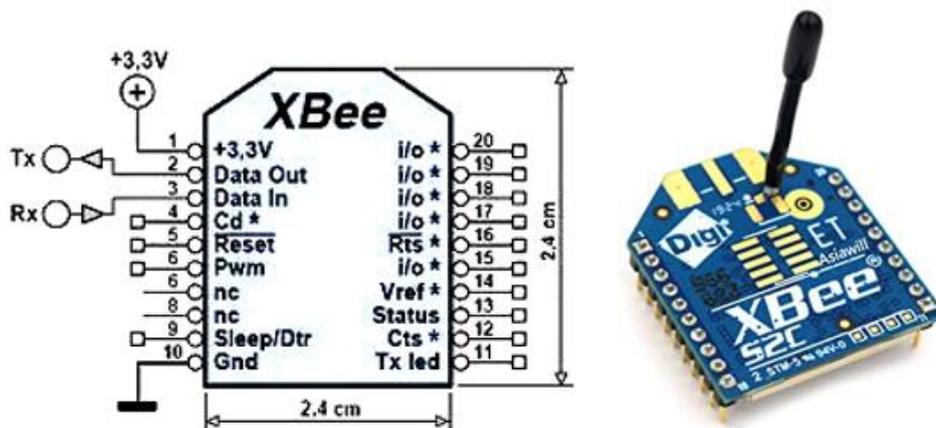


Figura 5: Módulo XBee [20].



En la Tabla 9 se muestran algunos de los módulos más comerciales de la familia XBee.

Tabla 9: Módulos de la familia XBee [21].

Módulo XBee	Características
XBee 802.15.4 (S1)	Módulo inicial para topologías punto a punto.
XBee DigiMesh 2,4	Proporciona un protocolo de red para topología en malla.
XBee SE	Integra la seguridad de clúster para consumo de energía inteligente de ZigBee
XBee PRO 900HP	Módulo a 900 MHz con alta ganancia en antena transmisora, rango de transmisión de 45 m.
XBee PRO XSC (S3B)	Compatible con radios de 9xStream.
XBee ZB S2C(S2)	Módulo a 2,4 GHz, incorpora un chip transceptor, mejor RAM.
XBee ZB S2C PRO	Mayor potencia que brinda un mayor alcance.
XBee 3 ZB 3.0	Compatible con Bluetooth de Baja Energía (BLE, <i>Bluetooth Low Energy</i>) y su procesamiento se puede hacer mediante micropython.



2. CAPÍTULO II: TÉCNICAS Y MÉTRICAS DE POSICIONAMIENTO

Los sistemas de posicionamiento en interiores requieren de técnicas y métricas que proporcionen una estimación adecuada de la posición del dispositivo receptor. Esto ha generado el desarrollo de diferentes métodos que se basan en el concepto de nodos fijos y nodos móviles, lo cual ha permitido la implementación de tecnologías que no requieren alta capacidad de procesamiento y almacenamiento.

El principal problema para la implementación de sistemas de posicionamiento de mediano y corto alcance está relacionado con la radio propagación y la estimación exacta de la posición, dado que estos sistemas requieren de una exactitud menor a 2 metros para diferentes aplicaciones. La radio propagación en interiores suele contar con NLOS y multitrayecto en la propagación de la señal hacia al receptor. La propagación por múltiples trayectos puede ocasionar pérdida adicional de la Intensidad de la Señal Recibida (RSS, *Received Signal Strength*) y retardos adicionales [22].

Teóricamente, una alternativa para estos problemas consiste en altas potencias y sistemas con amplio ancho de banda, sin embargo, estos sistemas tienen limitaciones dictadas por entes reguladores como el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) y la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunication Union*), que no permiten dichos cambios. Es importante resaltar que uno de los factores que más limita la eficiencia de los sistemas es la exactitud de las métricas que se utilizan para estimar la posición, por esto, es necesario estudiar los tipos de técnicas y métricas para posicionamiento en interiores, para encontrar la combinación más adecuada para trabajar con la tecnología ZigBee [7].

2.1 Técnicas de posicionamiento

Las técnicas de posicionamiento se definen como el mecanismo o procedimiento que emplea un criterio de clasificación medible respecto a una señal recibida [23]. Estas mediciones son tomadas muestreando la señal recibida en el instante de tiempo de llegada y están relacionadas con la posición de los nodos transmisores. De esta manera, se pueden tener medidas en el nodo destino (ND) y en el nodo referencia (NR) [19]. Generalmente las técnicas se pueden clasificar por el método de medición, algunas de las cuales se basan en la estimación de distancia, en el análisis de escena o por su nivel de intensidad. Las más comunes se describen a continuación.

2.1.1 Celda de origen

Esta técnica se basa en el concepto de celdas de radiofrecuencia y se utiliza para determinar la posición de un dispositivo móvil por medio de su presencia en un área particular o basada en un fenómeno físico con alcance limitado. Consiste en asociar las coordenadas de la estación base al dispositivo receptor [23].



El dispositivo receptor generalmente se encuentra asociado al punto de acceso más cercano, por lo que la posición obtenida no será la más exacta. Esta técnica es poco exacta y depende del tamaño de las celdas, sin embargo, este método de posicionamiento es utilizado para aplicaciones con bajos requisitos de exactitud y puede resultar útil como un método de pseudo-localización, en la cual no se necesita la posición exacta del dispositivo sino conocer el área en la que se encuentra [19].

En la Figura 6 se observa cómo funciona la técnica de localización mencionada. Gráficamente se conforman celdas asociadas a estaciones base, las coordenadas estimadas serán las de la estación base más cercana al usuario, no obstante, esta técnica pierde exactitud cuando la celda es muy grande y el usuario a localizar se encuentra en la frontera entre dos o más celdas.

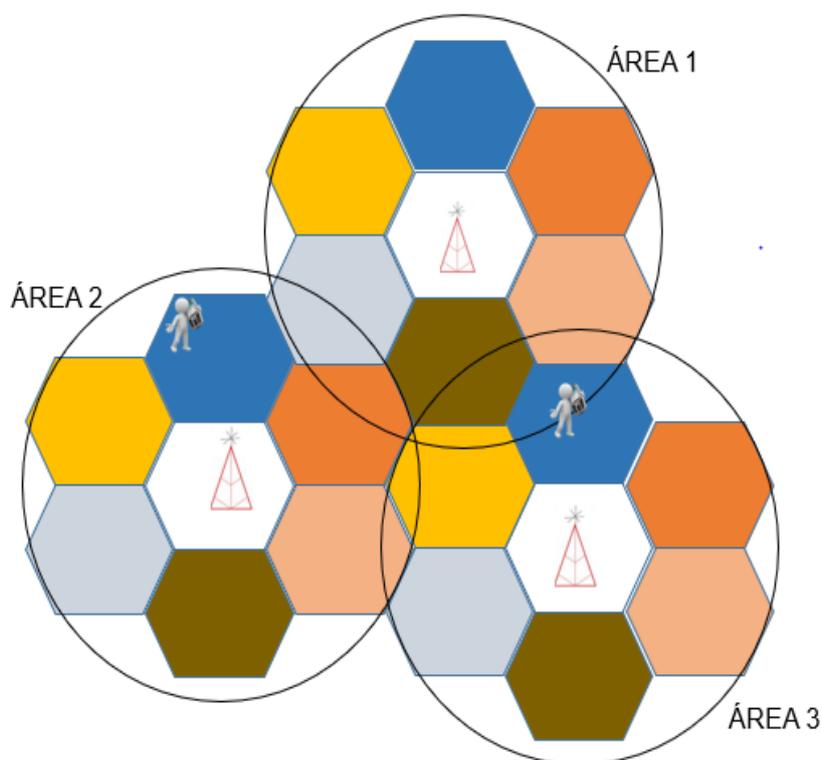


Figura 6: Localización basada en celda de origen.

2.1.2 Multilateración

La multilateración utiliza las propiedades geométricas de los triángulos y la medición de distancia para obtener la posición del objeto. Esta técnica consiste en calcular la posición de un objeto midiendo su distancia a múltiples puntos de referencia, dependiendo la dimensión requerida, varía la cantidad de nodos, para dos dimensiones (2D) tres nodos y para tres dimensiones (3D), mínimo cuatro nodos.

El mecanismo más usado que se basa en estos principios es la trilateración, que consiste en determinar la posición absoluta o relativa de un ND empleando 3 nodos



de referencia, donde la ubicación de los NR es conocida y se encuentran fijos dentro del escenario. Alrededor de cada NR se forma una circunferencia, donde el radio va a representar la distancia entre el NR y el ND, estas distancias serán determinadas por métricas que usualmente se basan en la medición de distancia.

En la Figura 7 se ilustra el proceso de trilateración para 2D, donde $ND(x, y)$ es la ubicación del usuario a localizar y $NR_1(x_1, y_1)$, $NR_2(x_2, y_2)$, $NR_3(x_3, y_3)$ son las coordenadas de los nodos referencia. La ubicación de estos nodos es conocida y d_1 , d_2 , d_3 , representan las distancias entre el ND y los NR, respectivamente. Calculadas las distancias se emplea la formula general de la circunferencia.

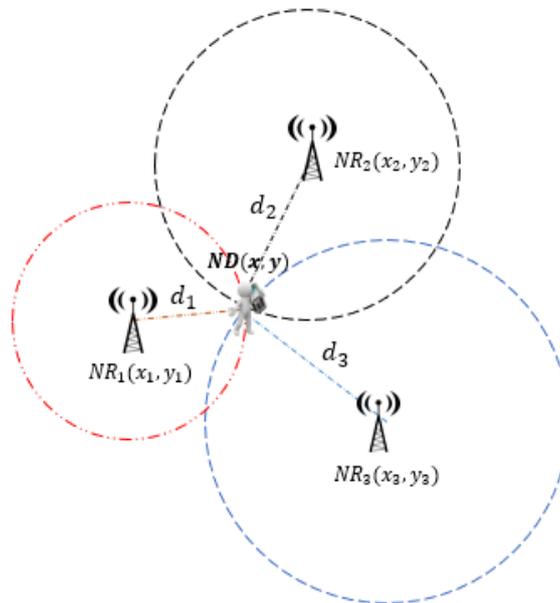


Figura 7: Trilateración para 2D.

$$d_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2. \quad (1)$$

El sistema de ecuaciones que se forman para encontrar las coordenadas del usuario a localizar se presenta en (1), de aquí se obtienen tres ecuaciones, donde su intercepción es la posición del usuario a localizar, sin embargo, debido a problemas de mediciones y procesamiento, lograr que estos tres círculos se encuentren en un solo punto es poco probable, por esto, se deben plantear diferentes métodos que corrijan este problema. Dentro de la matemática existen métodos para encontrar el punto de intersección entre tres puntos, denominados centroide, ortocentro, incentro y circuncentro, siendo el centroide, el que garantiza una mejor exactitud en la estimación de la distancia [24].

Como se muestra en la Figura 8, los círculos no pueden intersecarse entre sí, por ello, es necesario aplicar el método del centroide, donde cada círculo tiene dos puntos de intercepción, formando un triángulo dentro del espacio entre ellos. Los puntos A, B, C



representan esas intercepciones y determinando dichas coordenadas se puede hallar el punto medio entre los círculos [24].

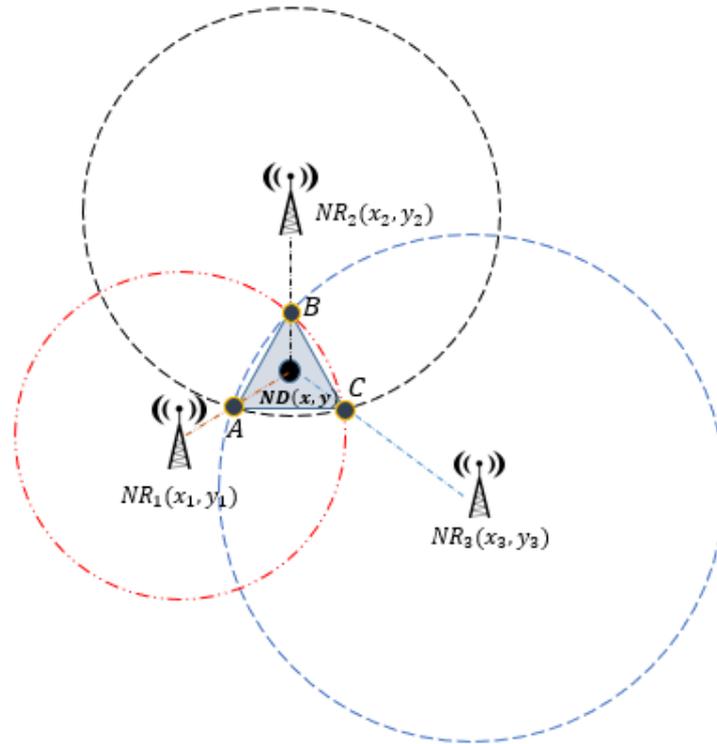


Figura 8: Trilateración basada en centroide.

Haciendo uso de (2) es posible estimar la posición del ND, basándose en las coordenadas de los puntos de intercepción. Cabe mencionar que, para establecer las distancias entre los nodos, es necesario emplear métricas de posicionamiento.

$$ND(x, y) = \left(\frac{x_A + x_B + x_C}{3}, \frac{y_A + y_B + y_C}{3} \right). \quad (2)$$

2.1.3 Angulación

La angulación emplea ángulos para estimar la posición de un objeto. En general, la localización 2D requiere de dos ángulos y una longitud conocida, así como la distancia entre los nodos de referencia para especificar la posición exacta [25]. En la Figura 9, la distancia entre NR_1 y NR_2 es conocida y los ángulos pueden ser determinados por (3).

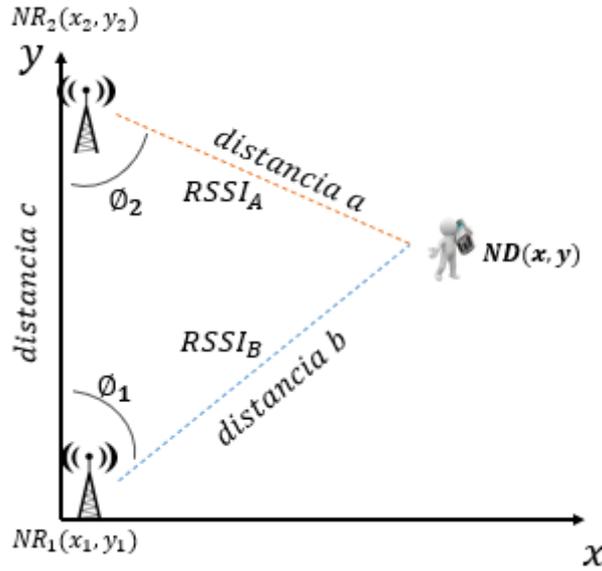


Figura 9: Angulación para 2D.

$$\tan \phi_1 = \frac{y-y_1}{x-x_1}. \quad (3)$$

$$\tan \phi_2 = \frac{y-y_2}{x-x_2}.$$

De (3) se obtiene el sistema de ecuaciones (4), donde (x_1, y_1) y (x_2, y_2) son conocidos.

$$x \tan \phi_1 - y = x_1 \tan \phi_1 - y_1. \quad (4)$$

$$x \tan \phi_2 - y = x_2 \tan \phi_2 - y_2.$$

Matricialmente el sistema en (4) se puede representar como se presenta a continuación:

$$\begin{bmatrix} \tan \phi_1 & -1 \\ \tan \phi_2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \tan \phi_1 - y_1 \\ x_2 \tan \phi_2 - y_2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

El sistema matricial en (5) es equivalente al presentado en (6).

$$A \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = c. \quad (6)$$

Obtenido el sistema matricial descrito anteriormente es posible aplicar el método de Estimación por Mínimos Cuadrados (LSE, *Least Square Estimation*) para determinar la posición del usuario como se presenta a continuación [26]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T c. \quad (7)$$



Esta técnica también puede estimar la posición de un usuario mediante la obtención del valor RSS de un intercambio de tramas entre los nodos. Este método alternativo consiste en establecer comunicación entre el ND y el NR y cuando el usuario envía una trama, esta contiene el valor RSS para esa ubicación en específico. El valor resultante sirve para calcular los ángulos que se forman entre los nodos. Para lograr esto, se emplea el teorema del coseno presentado a continuación.

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \times \text{Cos}(\phi_i). \quad (8)$$

Donde, a , b , c son las distancias entre los nodos y $i = 1, \dots, N$. Reemplazando las distancias en las ecuaciones de la circunferencia descritas en (9) se pueden obtener los valores de los ángulos [26], tal como se presenta a continuación:

$$\phi_i = \cos^{-1} \left(\frac{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 - (x_1-x_i)^2 - (y_1-y_i)^2}{2\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} \right). \quad (9)$$

Una vez calculados los ángulos que se forman en el escenario, se establece el sistema de ecuaciones en (3), sin embargo, realizando un despeje de la ecuación (10) es posible determinar (x, y) que corresponden a las coordenadas del usuario final [27].

$$\begin{aligned} 4[(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2][(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2] \times \cos^2(\Delta\phi) \\ = [(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 \\ - (x_1-x_2)^2 - (y_1-y_2)^2]^2 \end{aligned} \quad (10)$$

Esta técnica es sencilla de implementar y tiene ventajas como el bajo procesamiento requerido, reducción considerable de nodos, no necesita hardware adicional y se puede aplicar a distintos escenarios, sin embargo, su exactitud tiende a ser moderada, por esto, esta técnica suele combinarse con diferentes mecanismos que potencian su funcionamiento.

2.1.4 Detección por Proximidad

Los algoritmos de proximidad proporcionan información relativa o simbólica, basándose en una densa red de antenas o sensores y para cada objetivo móvil se asume la misma posición que tiene el sensor o antena más cercano. Generalmente cuando un dispositivo receptor se encuentra en el área de cobertura de varias estaciones base, se considera localizado por la estación base que más intensidad de señal reciba. Este método puede ser aplicado en diferentes tipos de medios físicos. Existen tres métodos generales para determinar la proximidad entre puntos:

1. Por contacto físico, es el método más básico de proximidad y se suelen utilizar sensores de presión, de tacto o detectores de capacitancia.
2. Estableciendo puntos de acceso inalámbricos y la conexión de dispositivos móviles.



3. Observando sistemas automáticos de identificación. Algunos ejemplos de este sistema son los terminales de puntos de venta con tarjeta de crédito, los historiales de *login* en computadores y los registros de llamadas de teléfono.

Las aplicaciones basadas en esta técnica han sido predominantes en el mercado, sin embargo, presentan la necesidad de realizar un diseño y despliegue específico para cada escenario, además, su uso se limita a los usuarios dentro de ese escenario [23].

2.1.5 Fingerprinting

También llamado reconocimiento de patrones de radiación es una técnica basada en el análisis de escena, implementada en la localización para interiores de los que se conoce su geometría y los elementos que lo componen. Esto permite realizar un estudio detallado de la infraestructura, además, de mapas con las características del escenario. Esta información ayuda a identificar en qué punto se encuentra un usuario y corregir los datos del proceso de localización si este presenta fallas [28].

Esta técnica consiste en la comparación de dos muestras tomadas sobre un mismo lugar y se parte de la premisa sobre la cual cada punto muestreado tiene características específicas. Inicialmente, se realiza un análisis del escenario con el parámetro seleccionado, usualmente, se toma el valor RSS obtenido por medio de una trama enviada entre los nodos y a este valor se le asigna una posición en coordenadas, logrando conformar un vector de medidas. Seguido a esto, se estima la posición del usuario comparando los valores muestreados con los obtenidos en la ejecución del sistema. Para desarrollar esta técnica es necesario implementar dos fases: Fase fuera de línea y Fase en línea [9].

- Fase fuera de línea

También llamada fase de calibración y consiste en la toma de valores RSS producto del intercambio de tramas entre el ND y los diferentes NR sobre las ubicaciones que se han definido, esto para crear un mapa de huellas o puntos, donde cada punto tiene un valor específico que lo diferencia de los demás, mientras más nodos referencia se tengan en el escenario, más exacto va a ser el sistema. Posteriormente, cada punto o huella es asociado a una coordenada cartesiana, logrando formar un vector de medidas. En la Figura 10 se puede observar el esquema general de la calibración, los sensores dentro del escenario toman las medidas RSS y se crea el vector donde se relacionan los valores con la coordenada cartesiana de esa ubicación. Las medidas se almacenan en una base datos [9].

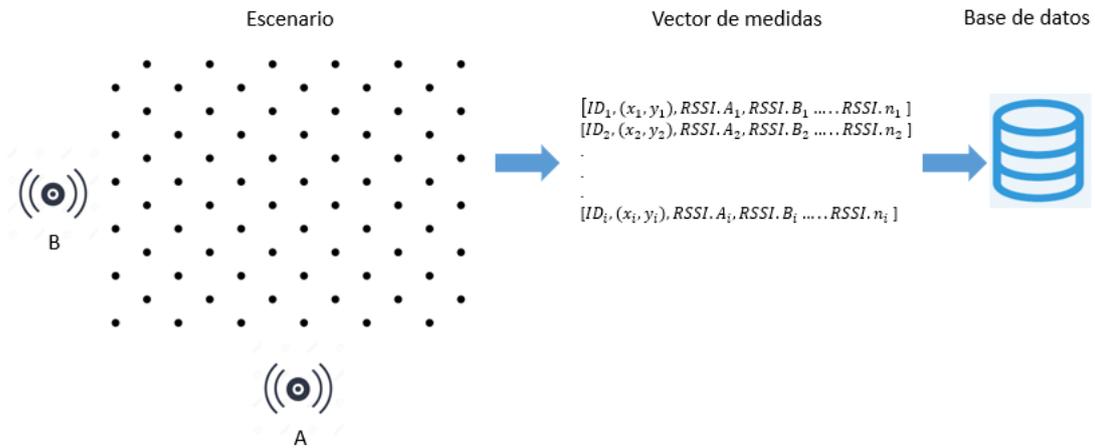


Figura 10: Fase off-line.

En la etapa fuera de línea, calibrar el espacio seleccionado es el mayor de los retos a los que se enfrenta esta técnica, pues los escenarios tienden a cambiar con facilidad porque puede variar la orientación de los elementos, el movimiento, las condiciones climáticas u otros factores que pueden alterar el escenario.

- Fase en línea

La fase en línea se encarga de determinar la posición del usuario, como se observa en la Figura 11, para lo cual se define un nodo destino para ubicar, se intercambian las tramas con el valor RSS para ese punto y se comparan los valores recolectados con los vectores almacenados en la base de datos por medio de un algoritmo. Finalmente, la ubicación del nodo destino se despliega mediante un dispositivo de visualización.

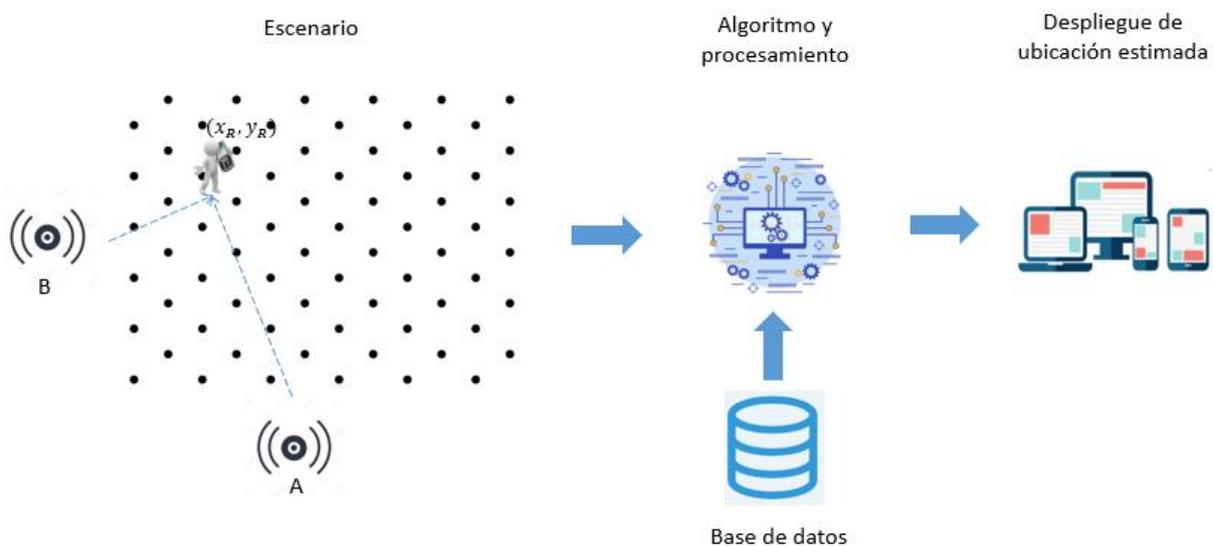


Figura 11: Fase online.



En *Fingerprinting* existen diferentes algoritmos para estimar la posición de un usuario. Un método ampliamente usado consiste en calcular la menor distancia euclidiana entre los vectores obtenidos, también hay modelos determinísticos y probabilísticos. La selección del algoritmo depende de las características y requerimientos del sistema [29].

2.1.6 Vision Analyzing

Técnica usada para ubicar objetos o personas en un escenario interior mediante cámaras fijas, buscando cubrir toda el área de estudio y capturar imágenes en tiempo real. Proporciona información de la posición sin necesidad de usar dispositivos de seguimiento adicionales [30], solo se requieren las imágenes para determinar la ubicación del objetivo. Las imágenes son almacenadas en una base de datos [26], se analiza una determinada imagen y posteriormente, se estudian las características y los cambios que ha sufrido el escenario, en un periodo de tiempo determinado. Dependiendo de las variaciones de la escena, se puede encontrar la nueva posición del objeto [30]. La ventaja de esta técnica es que los cambios en el escenario se pueden estudiar por un observador capaz de establecer la información que requiere [16].

2.1.7 Dead Reckoning

Esta técnica consiste básicamente en establecer la posición actual del objeto en un intervalo de tiempo definido, si el objeto se desplaza y el sensor pierde la ubicación, conociendo la dirección y la velocidad es posible calcular la distancia recorrida y de esta forma actualizar la ubicación del objeto [29]. Este mecanismo de posicionamiento es implementado por sistemas de navegación inercial que proporcionan información de la ubicación muy precisa y exacta [31].

Este método proporciona la información disponible sobre la posición actual de un dispositivo, utilizando un menor procesamiento, sin embargo, por la baja complejidad de este método, está sujeto a errores significativos de aproximación. Para que este mecanismo funcione de manera precisa, se debe conocer tanto la velocidad como la dirección del dispositivo en todo el transcurso del recorrido. Generalmente los errores de aproximación incrementan cuando el tiempo de observación es mayor, haciendo de este método poco eficiente en recorridos largos [29].

2.2 Métricas de posicionamiento

Las métricas de posicionamiento se definen como el parámetro o variable que sirve para la estimación de la posición de un objeto dentro de un escenario. Su criterio de medición varía dependiendo el tipo de aplicación y los más conocidos son: el tiempo, el ángulo, la fase y la potencia. Establecer de forma adecuada el tipo de métrica depende de diferentes factores, sin embargo, un aspecto importante para resaltar consiste en que la métrica debe ajustarse a los procesos descritos por la técnica seleccionada.



2.2.1 Tiempo de Llegada

El principio general del Tiempo de Llegada (ToA, *Time of Arrival*) consiste en estimar el tiempo que emplea una señal enviada desde un NR hasta alcanzar el ND, a partir de los momentos de salida y llegada de la señal. De esta forma, la distancia entre los nodos puede estimarse mediante la siguiente ecuación (11).

$$d = c \times (t_{NR} - t_{ND}), \quad (11)$$

Donde c , es la velocidad de la luz ($3 \times 10^8 \text{ km/seg}^2$). Cada estimación de distancia establecerá una línea de posición alrededor de cada NR, para el caso de ToA, será una circunferencia, con centro en el NR y la distancia estimada será su radio. En la Figura 12 se muestra la conformación de la circunferencia mediante el ToA.

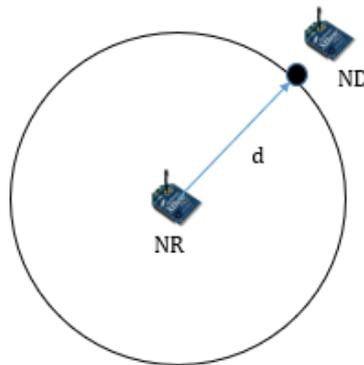


Figura 12: Conformación de la distancia mediante ToA.

Conocida la distancia de al menos tres NR, la posición se determina mediante la técnica de posicionamiento multilateración descrita en la sección 2.1.2, esto es, encontrando el punto de intersección de las tres circunferencias correspondientes. En la Figura 13 se presenta un ejemplo donde se tienen tres NR cuya posición es conocida. Si todas las estimaciones de distancia desde el ND a los NR fuesen exactas, las tres circunferencias se encontrarían en un punto único, y éste coincidiría con la posición del ND [2].

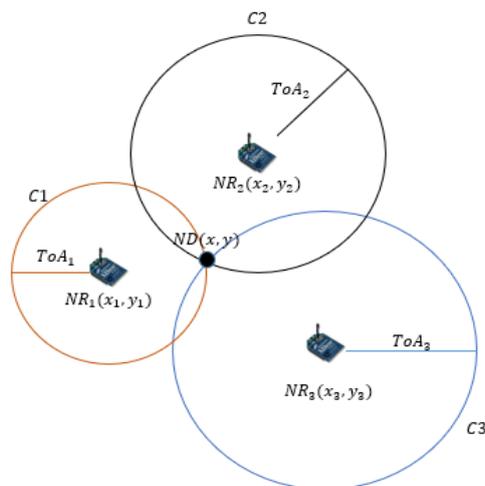


Figura 13: Ejemplo de ToA con tres nodos.

El uso de ToA requiere de sincronización de la red, de los relojes de transmisión y recepción, un error de un nanosegundo significa una diferencia en distancia de al menos 30 cm. La exactitud de los sistemas basados en ToA, depende del ancho de banda de la señal transmitida y de la cantidad de veces que se tomen las mediciones, esto, sumado a las situaciones de NLOS hacen que ToA sea particularmente difícil de aplicar en escenarios interiores, en los cuales la señal transmitida puede que llegue al receptor únicamente por reflexión, difracción, o tras haber traspasado un obstáculo, experimentando en el último caso una reducción en la velocidad de propagación, lo que genera un error en la estimación de distancia [32].

2.2.2 Diferencias entre los Tiempos de Llegada

La diferencia en los tiempos de llegada (TDoA, *Time Difference of Arrival*) toma las diferencias de tiempo de las mediciones de ToA, mediante estas diferencias en el retardo temporal se puede estimar la posición de dos maneras: calculando el sesgo introducido por la diferencia entre el reloj de los NR y el ND; o traduciendo las diferencias entre los tiempos de llegada de diferentes distancias y encontrando el punto donde se cortan las líneas de posición alrededor de cada NR. Generalmente, en las redes inalámbricas, el NR no está sincronizado con los ND. En este caso el problema de sincronismo en el receptor puede ser solucionado utilizando TDoA. Esta técnica tiene la ventaja de que el reloj del posible receptor no es relevante, ya que no importa si éste no está sincronizado con el NR [33].

Este mecanismo se puede representar mediante hipérbolas. Una hipérbola es aquel lugar geométrico de un punto tal que la diferencia de las distancias de dos puntos fijos (llamados focos, en este caso NR) es una constante. En la Figura 14 se detalla un ejemplo donde solo dos NR están sincronizados y desde el ND se calculan las diferencias en los instantes de llegada entre las señales provenientes de los NR, convirtiendo estas diferencias de tiempo en diferencias de distancia, con esta información se trazan las hipérbolas resultantes [33].

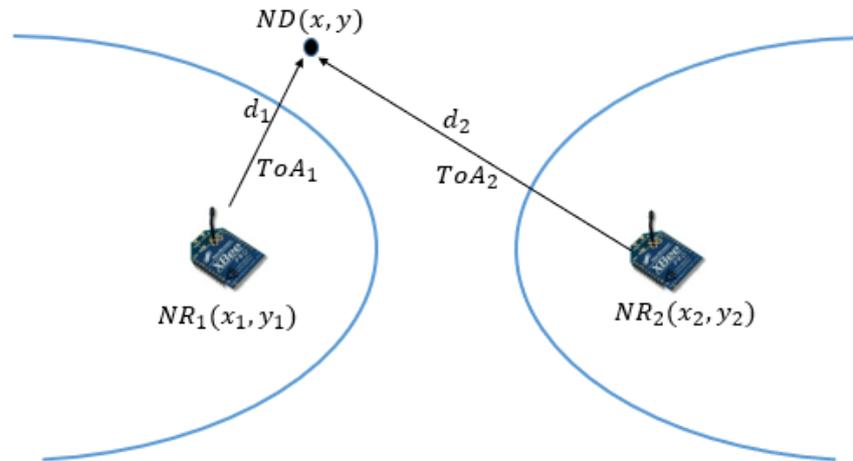


Figura 14: Medición de TDoA.

Midiendo los ToA en ambos nodos, basta con realizar la resta entre estos para obtener el TDoA, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$TDoA = ToA1 - ToA2. \quad (12)$$

Para encontrar el valor de la distancia (d), se debe aplicar la ecuación general de la hipérbola, la cual se presenta a continuación:

$$d = \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2}, \quad (13)$$

donde (x_n, y_n) son las coordenadas de los NR, (x, y) pertenecen al ND. Generalmente TDoA utiliza tres nodos NR, lo cual implica tres hipérbolas con focos en NR_1, NR_2, NR_3 . En la Figura 15 se observa cómo se trazan las hipérbolas y como se interceptan en el punto $ND(x, y)$.

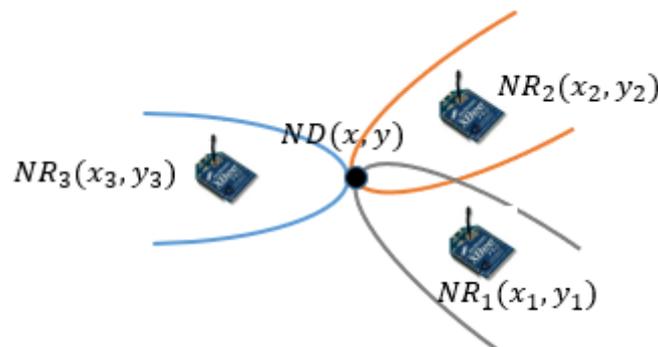


Figura 15: Localización de un ND mediante tres NR.

Finalmente, las coordenadas del ND pueden ser obtenidas despejando el siguiente sistema de ecuaciones:



$$\begin{aligned}\sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} &= c * ToA_{12}, \\ \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} &= c * ToA_{23}, y \\ \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} - \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} &= c * ToA_{31}.\end{aligned}\tag{14}$$

2.2.3 Ángulo de Llegada

La métrica de ángulo de llegada (AoA, *Angle of Arrival*) consiste en la medición del ángulo de incidencia de la onda recibida en los nodos referencia proveniente del nodo destino. Se deben utilizar al menos dos NR, con dos ángulos para determinar la posición del ND. La medición del ángulo puede ser llevada a cabo mediante dos formas, una antena direccional que barre todas las direcciones de interés o por medio de un arreglo de antenas. El primer tipo requiere de procesos mecánicos lentos e ineficientes energéticamente, por lo cual, es más usado el segundo método. Por medio de los arreglos de antena se utiliza la distancia recorrida por la señal hasta llegar a cada una de las antenas separadas espacialmente, de esta forma se determina el ángulo de incidencia.

Una de sus principales ventajas es que la estimación de la posición se puede determinar con tan solo dos NR y no se requiere ninguna sincronización de tiempo entre los NR y el nodo destino. En la Figura 16, la posición del ND se determina como el punto de corte entre las rectas definidas por los ángulos en cada uno de los NR.

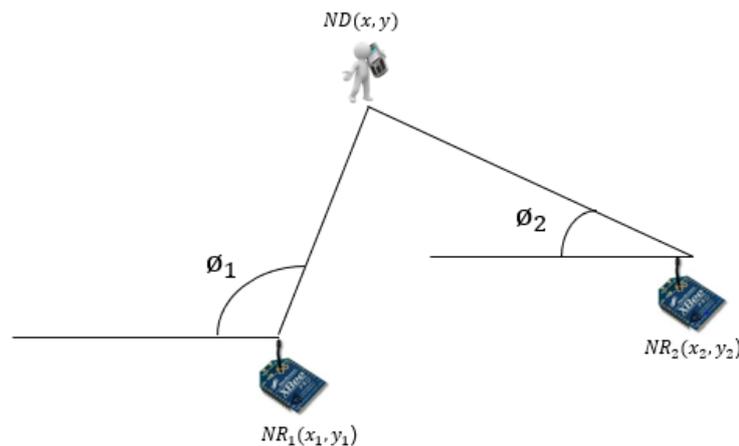


Figura 16: Ejemplo de AoA.

AoA presenta algunas desventajas, como la implementación de hardware relativamente grande y complejo. La exactitud de los sistemas basados en AoA es inferior a la proporcionada por ToA, aunque puede ser comparable, cuando se realiza en distancias cortas. También, este método se ve afectado por condiciones de NLOS, donde la señal sufre de reflexión y es identificada erróneamente [21].



2.2.4 Fase de Llegada

Los métodos basados en Fase de Llegada (PoA, *Phase Of Arrival*) utilizan la diferencia de fase o fase de la señal portadora para determinar la distancia entre el NR y el ND. La premisa base de este método consiste en suponer que tanto el ND y NR, emiten señales de forma sinusoidal pura con la misma frecuencia y desplazamiento de fase cero.

En la Figura 17 las señales incidentes llegan con una diferencia de fase a diferentes dispositivos o arreglos de antena, esta diferencia se utiliza para obtener la ubicación del ND. PoA se puede combinar con RSSI, ToA y TDoA para mejorar la exactitud de posición y el desempeño del sistema. El principal problema de PoA consiste en que necesita LOS para una adecuada exactitud, que generalmente no se logra en escenarios cerrados [16].

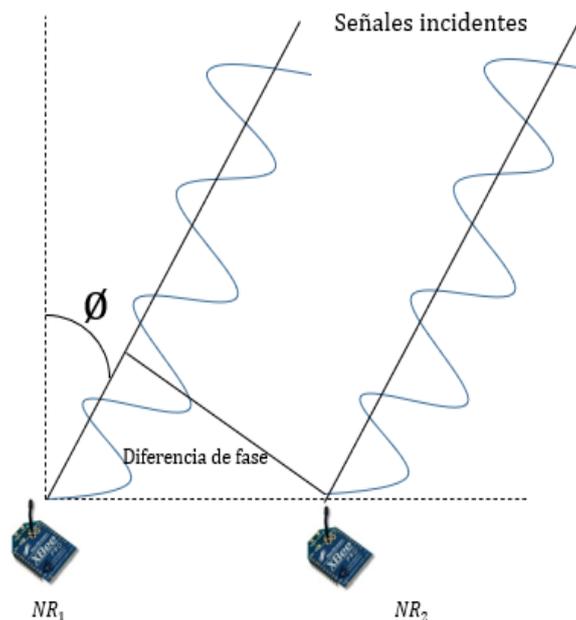


Figura 17: Ejemplo de PoA.

2.2.5 Tiempo de Ida y Vuelta

La técnica Tiempo de Ida y Vuelta (RTT, *Round Trip Time*) consiste en que uno de los nodos (NR o ND) envía una trama de control al otro extremo (NR o ND) activando así un temporizador, el extremo contrario envía un ACK confirmando la llegada de la trama y finaliza el temporizador cuando la respuesta ha alcanzado el nodo donde inició el envío de la trama original, siendo el tiempo transcurrido será el RTT, esta métrica no requiere de sincronización entre los nodos porque todas las mediciones son ejecutadas en el mismo nodo, lo cual permite que el método pueda ser aplicado



a redes en malla no coordinadas, con la ventaja de baja complejidad y costo reducido [9].

En la Figura 18 se describe el procedimiento de Solicitud para Enviar y Libre para Enviar (RTS/CTS, *Request To Send/Clear To Send*), el cual consiste en el envío, por parte del nodo origen de una trama RTS. Pasado el Espacio entre Trama Corto (SIFS, *Short Inter-Frame Space*), el nodo receptor, responde con una trama CTS, señalando al primero que el medio está libre para realizar envío de datos [9].

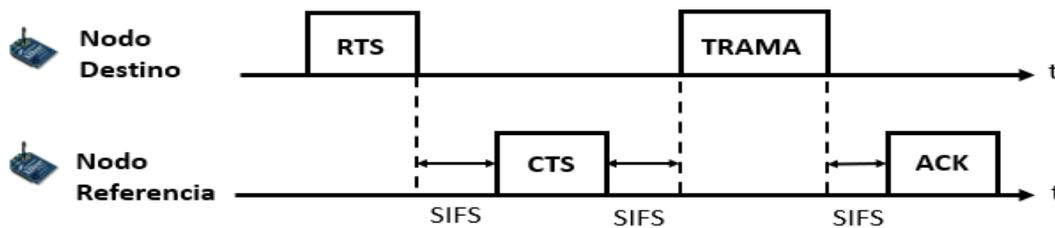


Figura 18: Mecanismo RTS/CTS.

La Figura 19 muestra la forma en la que se puede medir el RTT transcurrido en el intercambio de las tramas de control RTS/CTS entre dos nodos inalámbricos. Para calcular el RTT se debe medir el TOA entre los nodos, además de añadir un tiempo de procesamiento, la fórmula para calcular el RTT se observa en (15). Sin embargo, para estimar la distancia que separa ambos nodos, no es necesario conocer el tiempo que tarda el intercambio de las tramas de control en el NR, ni la velocidad de las señales en el medio, basta con asegurar que estos parámetros son relativamente constantes, así, se puede utilizar un método de regresión lineal, que permita estimar distancias a partir del RTT [34].

$$RTT = (TOA \times 2) + t_{procesamiento} \quad (15)$$

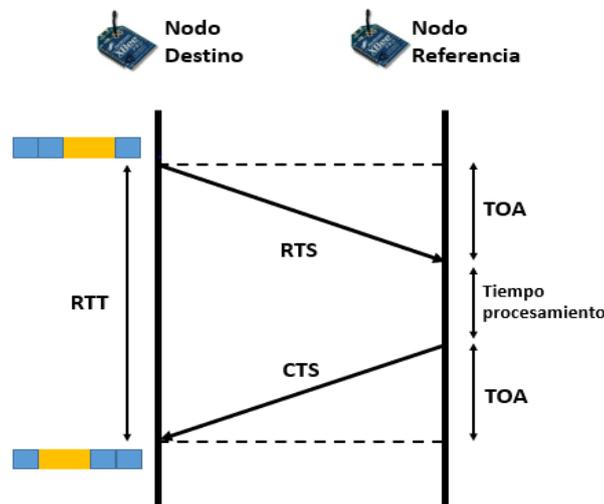


Figura 19: Cálculo de RTT.



El inconveniente de este método radica en que las mediciones realizadas en múltiples dispositivos deben llevarse a cabo secuencialmente, lo que genera latencias críticas para aplicaciones donde los dispositivos se desplazan rápidamente [17].

2.2.6 Indicador de la Intensidad de Señal Recibida

La métrica que mide el Indicador de la Intensidad de la Señal Recibida es una escala de referencia para medir el RSS en un dispositivo en una red inalámbrica, promediado durante un cierto periodo de muestreo. Este se basa en medir la potencia de una señal transmitida desde un nodo a un usuario final y viceversa. Generalmente, en los sistemas de posicionamiento se utiliza esta métrica porque permite estimar la posición para cualquier nodo inalámbrico convencional [35].

Los métodos basados en modelos de propagación utilizan la atenuación de la señal para obtener la distancia entre el NR y el ND, puesto que la potencia de transmisión en el NR es constante y conocida, además, el ND es capaz de medir la potencia recibida, esto ocasiona que la atenuación producida pueda ser medida restando las potencias. Este valor depende básicamente de la distancia y del efecto del multitrayecto. En los modelos de propagación como Okumura-Hata o Egli, la exactitud depende de cómo se ajuste el modelo a las condiciones reales del escenario [36].

Esta métrica se ve afectada por NLOS y multitrayectoria, ya que las señales deben atravesar paredes, techos y objetos domésticos tales como muebles, sillas, mesas, entre otros. A razón de esto, los modelos de propagación para interiores deben tener un análisis experimental que generalice las condiciones y características de dichos escenarios. El modelo de propagación más usado para escenarios interiores es el de pendiente única, ya que puede ser empleado para una amplia variedad de entornos, además, de su fácil comprensión. Este consiste en determinar un ajuste lineal de medidas por medio de una regresión [37].

El modelo de pendiente única en (16) permite predecir las pérdidas en el escenario, donde L_0 es la referencia de pérdidas a 1 m de distancia, n es el exponente de propagación y d es la distancia entre los dispositivos. L_0 y n varían dependiendo del escenario de propagación [6].

$$L(dB) = L_0 + 10n \log d(m). \quad (16)$$

Si se combina el modelo de pendiente única en (16) con la ecuación del balance del enlace (17), se obtiene la relación entre el valor RSSI y la distancia, en la ecuación (18), donde $RSSI(dBm)$ representa la intensidad de la señal entre dos nodos separados por una distancia $d(m)$. $A(dBm)$ constituye la intensidad de la señal tomada generalmente a 1m y n es el factor de atenuación para cada escenario [38].

$$RSSI(dBm) = G_{TX} + P_{TX} - L. \quad (17)$$

$$RSSI(dBm) = A(dBm) - 10 n \log d(m). \quad (18)$$



Despejando (18), la distancia se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$d(m) = 10^{\left(\frac{RSSI(dBm) - A(dBm)}{-10n}\right)} \quad (19)$$

RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) es una métrica ampliamente utilizada por su fácil implementación, bajo costo y complejidad reducida, sin embargo, esta se ve afectada por el NLOS, el multitrayecto y algunos efectos de desvanecimiento. Esta métrica es utilizada en conjunto con algunas técnicas como trilateración, angulación, *Fingerprinting* y proximidad para la estimación de la posición.



3. CAPÍTULO III: SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA INTERIORES EMPLEANDO ZIGBEE

Para el análisis de la exactitud en interiores es necesario implementar una metodología que estructure los pasos para el desarrollo del sistema de posicionamiento basado en la tecnología ZigBee. Para este caso, es preciso utilizar una metodología ampliamente personalizable, que permita ajustarse a proyectos de cualquier escala.

La metodología RUP o Proceso Unificado Racional (*Rational Unified Process*), es el método estándar más utilizado para el análisis, implementación y evaluación de sistemas orientados a objetos. RUP se caracteriza porque no es una metodología con pasos estrictamente definidos, si no un grupo de procesos adaptables al contexto y necesidad que se requieran [30].

Como se puede observar en la Figura 20, el ciclo de vida RUP, es una implementación desarrollada en espiral, esta metodología está compuesta generalmente por cinco etapas. La etapa inicial se compone de la recolección de requisitos, aquí se establecen los requerimientos del sistema y se verifican que sean realizables. En la siguiente etapa que se denomina análisis y diseño, tiene como objetivo planear como se llevara a cabo el sistema, observando en conjunto la parte software y hardware, seleccionando la técnica y métrica de posicionamiento, además, de los dispositivos y programas que mejor interactúen. En la etapa de implementación se construirá el sistema propuesto, teniendo en cuenta los requerimientos, análisis y diseños realizados. Esta etapa es de suma importancia ya que tiene como finalidad entregar el producto realizado. La etapa de prueba es donde se testea el producto final, en este se corrobora que el sistema arroje resultados coherentes a lo propuesto. Finalmente se concluye con la etapa de evaluación, en dicha etapa se analizará si el sistema presenta resultados favorables o propicios, mediante diferentes criterios de evaluación [31].



Figura 20: Ciclo de vida de metodología RUP.



3.1 Requisitos

Para el desarrollo y construcción del sistema de posicionamiento, se deben proponer y definir los requisitos que determinen el alcance y la proyección, los requerimientos se deben ajustar al propósito general del proyecto y a las características que brinda ZigBee. Los requisitos planteados se describen a continuación.

3.1.1 Requisitos funcionales

- Ubicar la posición actual de un dispositivo en un entorno interior.
- Operar correctamente con la menor cantidad de dispositivos posibles.
- Emplear dispositivos de bajo costo.

3.1.2 Requisitos no funcionales

- Tener un error de exactitud igual o menor a 1 m.
- Brindar una cobertura adecuada para escenarios cerrados.
- Buscar que el sistema sea escalable.
- Proporcionar la información de posicionamiento en el menor tiempo posible.
- Emplear la técnica y métrica adecuada para estimar la posición de un usuario.

3.2 Análisis y diseño

Los sistemas de posicionamiento se basan en el modelo general de geolocalización, el cual se muestra en el diagrama en bloques de la Figura 21. Este modelo está constituido por 3 secciones: tecnología RF, algoritmo de posicionamiento y sistema de visualización. El bloque de tecnología RF es el encargado de emplear sensores para recolectar las señales recibidas; el algoritmo de posicionamiento procesa la información suministrada por los sensores, ejecuta la técnica y métrica con el fin de estimar la posición; el sistema de visualización proporciona las coordenadas del usuario a localizar, mediante una interfaz gráfica [39].

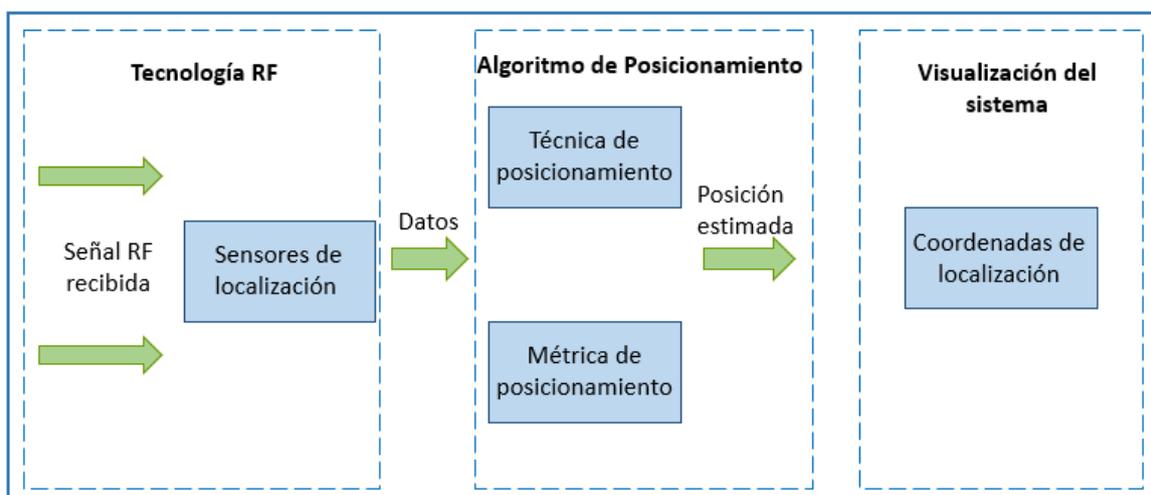


Figura 21: Diagrama en bloques del modelo general de geolocalización.



Establecidos los requisitos del sistema y teniendo en cuenta el modelo general de geolocalización, se plantea el diagrama general para el sistema de posicionamiento en interiores basado en la tecnología ZigBee, ilustrado en la Figura 22, este se compone de tres módulos: nodo destino, representa al usuario a localizar; nodo referencia, se encarga de recolectar y reenviar los datos obtenidos y el nodo procesamiento centraliza, gestiona, estima y despliega la información de posicionamiento.



Figura 22: Diagrama general del sistema de posicionamiento en interiores en ZigBee.

Al sistema de posicionamiento lo conforman los nodos mencionados anteriormente, estos realizan tareas específicas que se ejecutan de forma secuencial, en el diagrama de flujo de la Figura 23 se describe el proceso que hace cada nodo dentro del sistema. El nodo destino conforma tramas ZigBee que contienen el valor RSSI de la señal generada, estas se envían de forma constante a los nodos referencia, que se encargan de recibir y reenviar la trama al nodo procesamiento, donde se descomprime la trama para obtener el valor RSSI específico respecto a los nodos referencia, una vez obtenidos los valores RSSI se ejecuta el algoritmo de posicionamiento que emplea los procesos matemáticos descritos por la técnica seleccionada. Finalmente se obtienen las coordenadas de la posición estimada del usuario, que se despliegan mediante una interfaz gráfica.

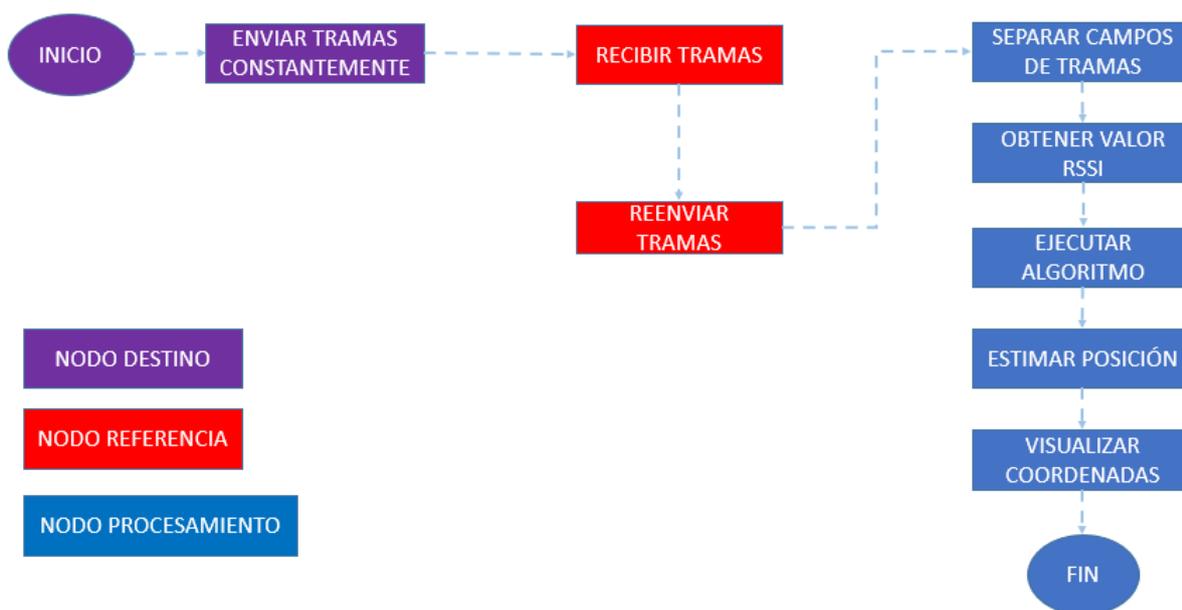


Figura 23: Diagrama de flujo general para el sistema de posicionamiento.



Descrito el proceso que realiza cada nodo, se debe seleccionar la métrica y técnica de posicionamiento que mejor se ajusten a los requisitos propuestos y a la tecnología.

3.2.1 Selección de Técnica y Métrica de posicionamiento

En la Tabla 10 se realiza una comparación entre las técnicas de posicionamiento nombradas a lo largo del capítulo 2, en la cual se presentan los parámetros más significativos de todas ellas.

Tabla 10: Comparación entre las técnicas de posicionamiento

Técnicas/ Parámetro	Cell-ID	Multilateración	Angulación	Proximidad	Fingerprinting	Vision analyzing	Dead reckoning
Complejidad matemática	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alto
Número de nodos	Mínimo 1	3 para 2D, 4 para 3D	2	>1	Aprox. 4	>1	>1
Sincronización	No	Si	No	Si	No	Si	Si
Hardware adicional	Si	No	No	Si	No	Si	Si
Métrica asociada	RSSI	RSSI, ToA, TDoA, RTT	RSSI, AoA	RSSI, RTT	RSSI	Imagen	ToA, TDoA, RTT
Fuentes de información	Alta	Alta	Alta	Media	Alta	Baja	Baja

Partiendo de lo mostrado en la Tabla 10, se puede realizar un análisis para seleccionar la técnica de posicionamiento que más se ajusta a la tecnología ZigBee y a los requisitos planteados, para esta selección se deben tener en cuenta diferentes elementos nombrados a continuación.

Cell-ID o celda de origen, presenta una complejidad matemática baja, no requiere de sincronización y emplea un parámetro generalmente proporcionado como lo es RSSI, sin embargo, por ser de bajo procesamiento y necesitar de hardware adicional como antenas, hacen que su exactitud sea muy baja, entregando resultados con errores en el orden de los kilómetros. La multilateración ha sido ampliamente utilizada, ya que cuenta con gran cantidad de información disponible, además, de ser compatible con diferentes métricas como RSSI, ToA y RTT, pero para un correcto funcionamiento requiere de tres nodos para el posicionamiento en 2D y cuatro para 3D, lo que hacen que sea una técnica de alto costo. La detección por proximidad es una técnica empleada cuando no se requiere de una alta exactitud, ya que la posición suministrada es la asociada al nodo que reciba más señal por parte del usuario final. *Fingerprinting* es una técnica robusta y consolidada que ha presentado buenos



resultados en escenarios *indoor*, su exactitud depende directamente del número de nodos dentro del sistema, no obstante, por requerir de una base de datos adicional y gran cantidad de nodos, además, de que se deben emplear algoritmos complejos, hacen que esta técnica tenga procesamiento y costo elevado. *Vision analyzing* y *Dead reckoning* son técnicas que buscan soluciones innovadoras, por esto se encuentran en desarrollo y experimentación, lo que ocasiona que tengan muy poca información disponible. Finalmente, Angulación requiere de una baja complejidad matemática, no necesita de hardware adicional y sincronización, también, es compatible con métricas generalmente utilizadas.

Basándose en lo anterior se puede deducir que angulación es la técnica que mejor se adapta a las necesidades, por su bajo costo, menor cantidad de dispositivos y su procesamiento reducido.

Una vez seleccionada la técnica de posicionamiento, se debe realizar el mismo proceso para escoger la métrica. La Tabla 11 muestra algunas características de las métricas detalladas anteriormente.

Tabla 11: Comparación entre las métricas de posicionamiento.

Métrica/	ToA	TDoA	AoA	PoA	RSSI	RTT
Característica						
Multitrayecto	Fuerte	Medio	Medio	Fuerte	Ligero	Ligero
Complejidad de AP's	Medio	Medio	Alto	Alto	Bajo	Medio
Distancia (NR-ND)	Amplia	Amplia	Media	Media	Media	Media
Sincronización de nodos	Si	No	No	Si	No	No
LOS	Si	Si	Si	Si	No	No
Tecnología	UWB	WLAN, UWB	RFID	UWB	RFID, ZigBee, WI-FI	ZigBee, WI-FI
Variable asociada	Velocidad, tiempo	Velocidad, tiempo	Angulo	Fase	Potencia	Trama

De acuerdo con lo expuesto en la Tabla 11 y basándose en la técnica seleccionada, solo hay dos opciones viables. AoA es una métrica que es susceptible al multitrayecto, necesita de Puntos de Acceso (AP, *Access Point*) complejos, ya que debe incluir hardware adicional como antenas o arreglos de antena, además, se ve afectada por NLOS. RSSI es una métrica eficiente y madura, con un gran despliegue en diferentes tecnologías que permite una fácil manipulación y obtención de su valor. Por esto se ha concluido que la combinación de la técnica de angulación con la métrica de RSSI, son las indicadas para analizar la exactitud en un sistema de posicionamiento empleando ZigBee.



El sistema está conformado por dispositivos hardware que permiten el envío y recepción de información, también por herramientas software que posibiliten las configuraciones y la gestión de la información, por ende, para diseñar los nodos del sistema es necesario describir estos elementos.

- **Dispositivos Hardware**

El sistema se compone en su mayoría por dispositivos de la tecnología ZigBee y dispositivos que permitan realizar el procesamiento de la información obtenida. ZigBee cuenta con una amplia gama de módulos, sensores y placas que permiten la comunicación inalámbrica. En la sección 1.7, se puede observar la Tabla 9, que describe algunos de los módulos más utilizados para diferentes aplicaciones.

Los módulos fabricados por Digi han evolucionado de forma constante, ofreciendo características que van de acuerdo con las necesidades del mercado, la serie 1 o llamados XBee 802.15.4 son los módulos precursores de esta familia, son sencillos y fáciles para trabajar, no requieren de configuración previa y sirven para comunicaciones Punto-a-Punto y Punto-Multipunto, estos no son compatibles con las series siguientes. Los XBee serie 2 o ZB S2C-S2B son la variante mejorada de la serie 1, funciona en la frecuencia de 2,4 GHz, puede ser configurada previamente e incluye una nueva versión de firmware, esto permite dos formas de trabajo, mediante modo transparente y por medio de comandos API; estos módulos son compatibles con topologías como Punto-a-Punto, malla, árbol y estrella. El XBee ZB 3.0 que viene con nuevas características como la compatibilidad con Bluetooth de Baja Energía (BLE, *Bluetooth Low Energy*) y la incorporación de micropython para la programación propia del módulo, esto hace que no sea necesario añadir microcontroladores externos. Todas las líneas incluyen su versión PRO que aumenta el rango de transmisión y garantiza una ganancia en la antena.

En la Tabla 12, se ponderan algunas de las especificaciones técnicas más relevantes de las tres series de los módulos XBee.

Tabla 12: Comparación entre las series de los módulos XBee [21].

Especificaciones	Serie 1(802.15.4)	Serie 2(ZB S2C-S2B)	Serie 3(ZB 3.0)
Chipset	Freescale MC13212	Ember EM357	Silicon Labs EFR32MG SoC
Potencia de Tx	1mW (0 dBm)	1,25mW (+1 dBm)	+8 dBm
Velocidad Tx de datos	250Kbps	250Kbps -1Mbps	250Kbps -1Mbps
Corriente de recepción	50 mA	28 mA	17 mA
Corriente de transmisión	45 mA	33 mA	40 mA
Voltaje de alimentación	2,8-3,4 V	2,1-3,6 V	2,1-3,6 V



Consumo modo sleep	en	10 μ A	1 μ A	2 μ A
Rango distancia	de	100m-exteriores 30m – interiores	1200m – exteriores 60m - interiores	3200m – exteriores 90m - interiores
Cifrado		AES de 128 bits	AES de 128 bits	AES de 128/256 bits
Antena		Si	Si	Si
Frecuencia		2,4 GHz	2,4 GHz	ISM 2,4 GHz
Sensibilidad		-92 dBm	-102 dBm	-103 dBm
Micropython		NO	NO	SI
Precio		\$ 135.000. COP	\$ 62.300. COP	\$ 227.290 COP

En la tabla 12 se evidencia que las características entre los módulos XBee son similares, sin embargo, hay aspectos que diferencian una serie de otra. La serie 2, específicamente el módulo XBee ZB S2C por sus características, su consumo de energía reducido, su compatibilidad con diferentes topologías, sus formas de trabajo y su bajo precio, hacen que sea el módulo adecuado para desarrollar el sistema de posicionamiento en interiores.

La gran mayoría de los módulos XBee requieren de un dispositivo que le permita intercambiar información con un computador, existen diferentes placas diseñadas para ese propósito, la más utilizada es la XBee Explorer USB, que sirve para modificar los parámetros de configuración del módulo, esto se realiza mediante un puerto serial del computador y un cable mini USB, esta cuenta con dos hileras de 10 pines para introducir el módulo, además, de 5 pines para manipular de manera externa el módulo, estos pines son Vcc, Gnd, Tx, Rx y Reset, además, se encarga de regular el voltaje a 3.3 V. Esta placa tiene un costo en el mercado de \$ 11.000 COP.

El sistema de posicionamiento requiere de un dispositivo que se encargue del procesamiento, esto se realiza mediante un sistema embebido que permita la centralización de la información recibida. En el mercado se encuentran todo tipo de tarjetas para procesamiento a baja escala, las más comunes son la Raspberry Pi, Arduino uno y el ESP32, estas cuentan con las capacidades necesarias para desarrollar el sistema propuesto, pero por la compatibilidad de ZigBee con Arduino, su amplia documentación y desarrollo en IoT, se deduce que la Arduino uno es la opción más viable para complementar los módulos XBee ZB S2C.

La tarjeta de desarrollo Arduino uno R3 es una placa basada en el microcontrolador ATmega328, proporciona 14 pines I/O digitales (6 analógicos), funciona a una frecuencia de 16 MHz, RAM de 2 Kb, memoria flash de 32 Kb, CPU que corre a 16 MHz, cuenta con un puerto USB y otro puerto para alimentación externa. Su precio se acerca los \$ 30.000 COP y se puede adquirir de forma física o virtual.



- **Herramientas Software**

Las herramientas software tienen un papel fundamental dentro del sistema, ya que estas realizan la configuración de los módulos y de la tarjeta de procesamiento, además, de gestionar, estimar y desplegar la información de posicionamiento. Digi suministra XCTU, un software multiplataforma que permite interactuar con los módulos mediante una interfaz gráfica que proporciona herramientas para probar y configurar los módulos XBee. XCTU sirve para inicializar, configurar, actualizar y probar los módulos, el cual se comunica mediante un puerto serial. Este programa brinda la posibilidad de ver un resumen de los parámetros y una descripción de cada uno [40].

Para recolectar y procesar la información suministrada por los módulos XBee XB S2C, es necesario emplear el entorno de programación de Arduino IDE (*Integrated Development Environment*), este sirve como editor de código, compilador y depurador, además, proporciona herramientas para cargar el programa ya compilado en la memoria flash de la tarjeta Arduino a través del puerto serial. Para ejecutar un código que contenga comandos para el módulo XBee, es necesario emplear las librerías de ZigBee y del puerto Serial.

El sistema propuesto requiere de un programa que procese, analice y despliegue la información de posicionamiento, esto se realiza mediante una plataforma de cálculo numérico. Matlab es la herramienta software utilizada para este propósito, este entorno de programación cuenta con diversas funcionalidades para el análisis de datos, también, ofrece la posibilidad de visualizar la información en interfaces gráficas.

3.3 Implementación

Para la implementación del sistema se deben conformar y configurar cada uno de los nodos que integran el sistema, a continuación, se describen los nodos, partiendo de los dispositivos hardware y herramientas software que se definieron anteriormente.

3.3.1 Nodo Destino

El ND alude esencialmente al dispositivo final o usuario a localizar, en ZigBee se emplea el termino *End Device* para denominarlo, este debe emitir señales periódicas con el valor RSSI obtenido en su ubicación actual. La Figura 24 muestra los componentes del ND, consiste en un XBee ZB S2C, con su respectiva placa Explorer USB y una fuente de alimentación, que puede ser una batería portátil recargable.



Figura 24: Componentes del nodo destino.

Para la configuración de los módulos XBee ZB S2C se emplea la herramienta software XCTU, esta proporciona una interfaz gráfica que permite modificar los parámetros de los módulos. En el apéndice A se explican las configuraciones realizadas y se describe cada uno de los parámetros, sin embargo, en la descripción de cada nodo se explica brevemente que parámetros y configuraciones se utilizan.

De forma inicial el módulo XBee debe conectarse a un computador (véase en apéndice A, sección 1), XCTU proporciona diferentes herramientas que permiten interactuar con los módulos, una de estas es la ventana de configuraciones donde se establecen y modifican parámetros. Cada nodo requiere de una configuración diferente, sin embargo, hay parámetros que deben ser similares en todos los módulos como el identificador de la red (ID), el tipo de comunicación (API) y los parámetros por defecto que no se modifican. Para el caso del nodo destino se deben configurar los siguientes parámetros:

- *ID*: 12
- *SM*: activado
- *DH* y *DL*: como el nodo destino debe comunicarse con dos nodos referencia, se establece el parámetro FFFFF.
- *AP*: modo API

Estos parámetros se describen detalladamente en el apéndice A, sección 2. Una vez realizadas las configuraciones iniciales para el nodo destino, se procede a formar la trama que el ND va a transmitir a los nodos referencia, este proceso se realiza mediante el generador de tramas que proporciona XCTU. En este se pueden conformar diferentes tipos de trama, específicamente se selecciona la trama *Remote AT Command* que permite incluir el valor RSSI en la trama por medio de un comando, dentro de esta trama se configuran parámetros como la dirección de destino (*DH*, *DL*) y la carga útil. La descripción de este proceso se presenta en la sección 3 del apéndice A. Establecidas las configuraciones iniciales y conformada la trama es posible elaborar el nodo destino que se muestra en la Figura 25.

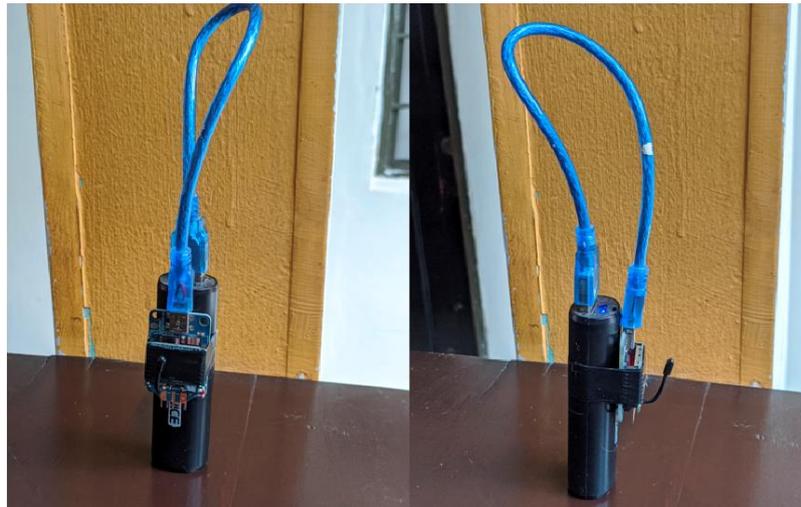


Figura 25: Nodo Destino.

3.3.2 Nodo Referencia

El nodo referencia, Router o baliza se encarga de recibir la trama proveniente del nodo destino y reenviarla al nodo procesamiento. Este requiere de un dispositivo XBee ZB S2C, una placa Explorer USB y una batería portable, este dispositivo es muy semejante al nodo destino, con la diferencia que debe emitir la información recolectada al nodo procesamiento. Teniendo en cuenta la técnica de posicionamiento, se requieren dos nodos referencia en el sistema. En la Figura 26 se muestran los componentes del NR.



Figura 26: Componentes del nodo referencia.

Para la configuración del nodo referencia se emplea XCTU y se establecen las configuraciones nombradas en el apéndice A, con la variación en el parámetro JV (*Channel Verification*) que se activa y en las direcciones de destino (*DH, DL*) que se modifican para tener comunicación directa con el nodo procesamiento.

Al transmitir las tramas entre los nodos, permite al NR establecer el valor RSSI de dicha comunicación, es decir, cada que se solicite la posición actual de un *end device*, este debe enviar tramas a cada nodo referencia con el valor RSSI para esa posición, como los NR se encuentran en ubicaciones diferentes, los valores RSSI van a ser distintos, por ende, cada trama de un NR debe ser reenviada al nodo procesamiento, en la Figura 27 se presenta el nodo referencia con sus componentes.

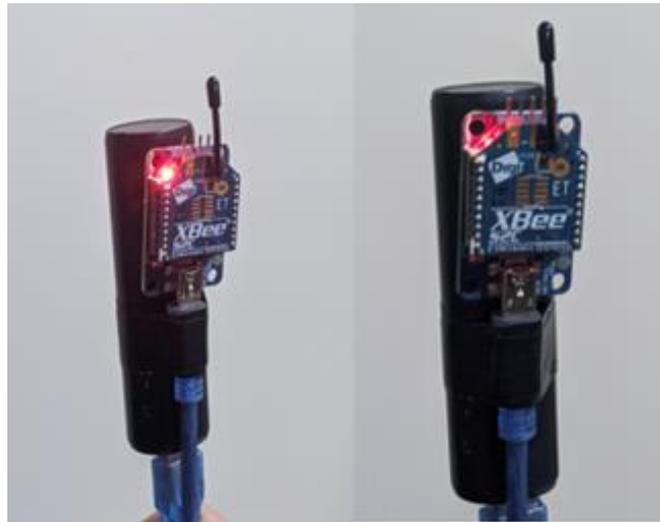


Figura 27: Nodo Referencia.

3.3.3 Nodo Procesamiento

El nodo procesamiento o nodo coordinador se encarga de centralizar, procesar y desplegar la información obtenida, la Figura 28 presenta cómo se divide el nodo: La recepción de datos es conformada por un módulo XBee ZB S2C y una placa Explorer USB; la gestión de datos la realiza una tarjeta Arduino uno; el procesamiento y despliegue de datos es ejecutado por un computador por medio de Matlab. A continuación, se describe cada una de las partes que forman el nodo procesamiento.

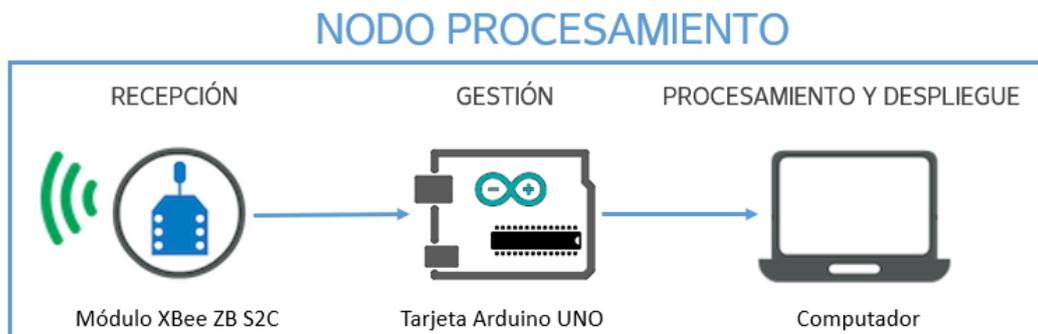


Figura 28: Diseño general del nodo procesamiento.

- Recepción de datos

Esta sección es la encargada de recibir las señales provenientes de los nodos referencia, para esto se emplea un módulo XBee ZB S2C y una placa Explorer USB. El módulo debe configurarse por medio de XCTU, se utilizan las configuraciones iniciales previamente descritas, pero para este caso se activa el modo coordinador, además de establecer la comunicación mediante tramas API.



- Gestión de datos

La tecnología ZigBee mediante sus dispositivos XBee permiten el intercambio de tramas, sin embargo, no proporcionan una herramienta que gestione y exporte la información obtenida. El sistema debe extraer el valor RSSI de la comunicación entre el ND y los NR, este valor se obtiene al reenviar las tramas al NP, pero XCTU no permite exportar la información, por ello, se emplea Arduino, que brinda la capacidad de extraer y manipular datos recolectados por medio de los módulos XBee. La conexión entre la tarjeta Arduino uno y el XBee ZB S2C se puede apreciar en la Figura 29, se conectan los pines de alimentación y tierra, los pines 10 y 11 de la tarjeta Arduino se utilizan para transmitir y recibir la información mediante los pines DIN y DOUT del XBee respectivamente.

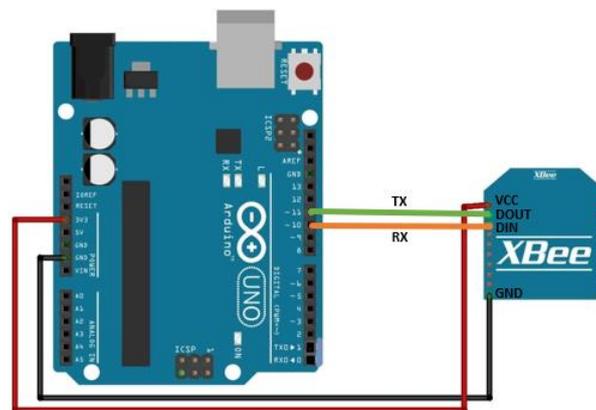


Figura 29: Conexión entre Arduino uno y XBee ZB S2C.

Arduino puede controlar cualquier tipo de dispositivo ZigBee gracias a su compatibilidad con las librerías XBee, esto permite realizar múltiples tareas basadas en radiofrecuencia. Para la conexión entre XBee y Arduino se emplea un puerto serial y se declara la librería *Software Serial*, sobre el puerto serial se incluye la librería XBee y se inicializan los pines que se van a utilizar en la tarjeta Arduino, para este caso se emplean los pines 10 y 11. Después de esto se hace la configuración de los puertos serial con su respectivo retardo, el código para la conexión entre Arduino y ZigBee se puede apreciar en el apéndice A, sección 4.

Como se mencionó anteriormente, XCTU no exporta datos a otros entornos de desarrollo, por esto el valor RSSI de las tramas provenientes de los NR no pueden ser separadas. Para obtener el valor RSSI de una comunicación entre un ND y los NR, es necesario configurar desde Arduino una petición a los NR, esto se realiza parametrizando una trama API con las direcciones MAC de cada uno de los NR. Como el NR tiene almacenada la trama API recibida desde el ND, el nodo procesamiento solo debe generar la misma trama cambiando las direcciones MAC de los routers o nodos referencia, para esto se emplea el comando `Xbee.write("parámetro")`. Esta función se debe emplear para cada nodo referencia y su trama resultante se enseña mediante el monitor serie COM de la Figura 30 .

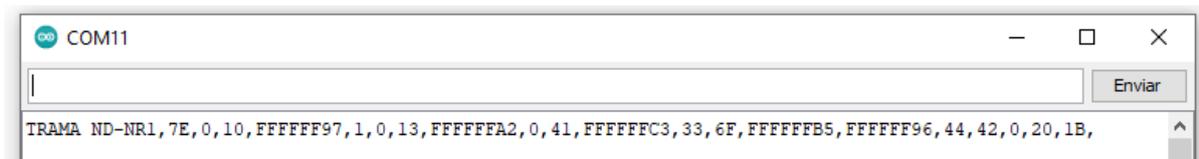


Figura 30: Trama obtenida con valor RSSI.

La trama obtenida está conformada por 20 bits y se compone de la siguiente forma, 7E 00 10 97 01 00 13 A2 00 41 C3 33 6F B5 96 44 42 00 20 1B, la cual se describe en la Tabla 13 .

Tabla 13: Descripción de trama API.

# bit	Bits	Descripción
1	7E	Delimitador: Indica inicio de paquete
2-3	00 10	Longitud: Número de bytes
4	97	Tipo de mensaje: <i>Remote AT Command Response</i>
5	01	<i>Frame ID</i> : Solicitud de respuesta
6-13	00 13 A2 00 41 C3 33 6F	Dirección de destino 64 bits: MAC de cada nodo referencia.
14-15	B5 96	Dirección de destino 16 bits
16-17	44 42	Nombre del comando AT: DB en ASCII
18	00	Código de estado: OK
19	20	Valor del comando AT: DB (Valor RSSI)
20	1B	<i>Checksum</i> : calculada por cada router, verificación de trama

Para comprobar el funcionamiento mediante Arduino, se realizan peticiones a los NR, la Figura 31 expone las tramas API desde diferentes distancias.

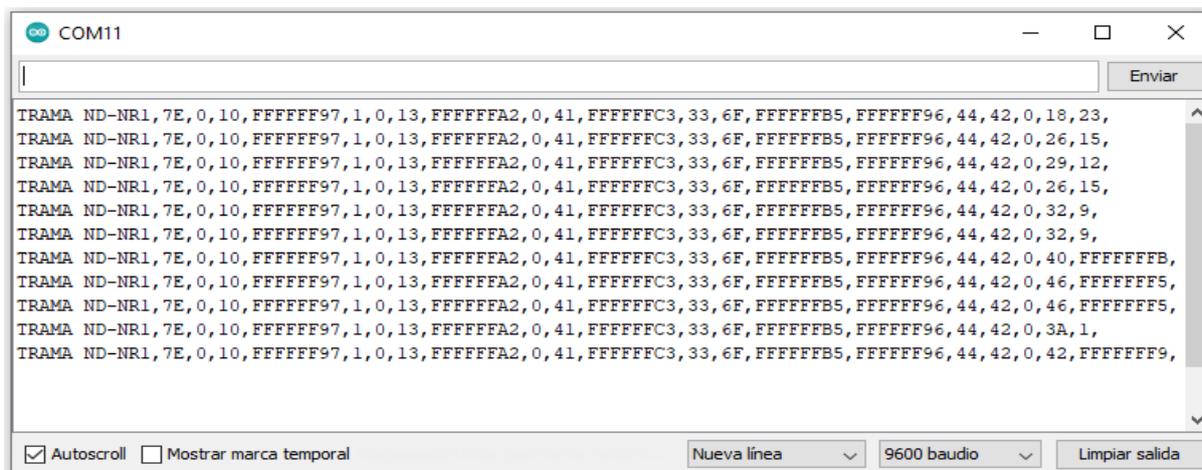


Figura 31: Tramas API a diferentes distancias.

La figura anterior muestra las tramas obtenidas, en estas se incluye el valor RSSI de la comunicación, sin embargo, en cuatro tramas se presenta un *checksum* con valores



de FFFFFFFF, esto indica que la trama tiene un error de comprobación y no es válida para pruebas del sistema.

- Procesamiento y despliegue de datos

Una vez recibida la trama API mediante Arduino, se divide en fragmentos para obtener el valor RSSI, para esto se emplea la herramienta de análisis y procesamiento matemático Matlab. Este programa permite extraer el campo específico donde se almacena el valor RSSI de la comunicación entre los nodos. Para realizar este proceso, se proponen los pasos descritos mediante el diagrama de flujo de la Figura 32.

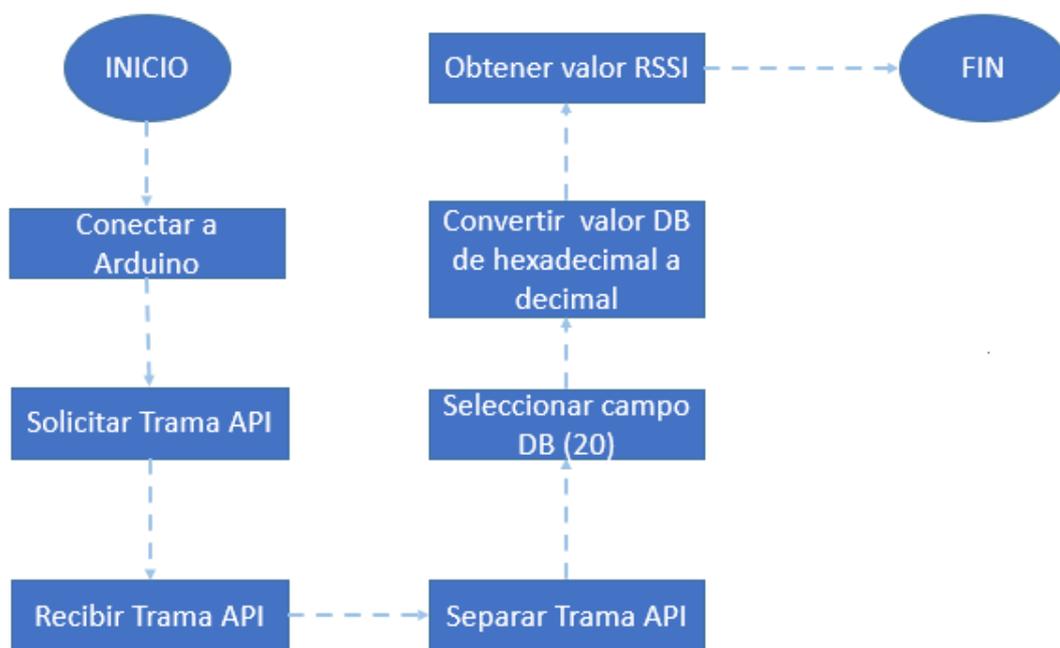


Figura 32: Diagrama de flujo para obtener valor RSSI de una trama API.

La figura 32 sirve para entender la lógica secuencial que va a realizar Matlab para obtener el valor RSSI de una trama, proseguido a esto se implementa el código en Matlab para desarrollar este proceso, el código resultante se explica en el apéndice A, sección 5. Para corroborar que el código funciona de forma correcta, se debe ejecutar y visualizar si el valor es coherente, los resultados se visualizan en la Figura 33.



```
Valor RSSI para de la trama entre ND y NR1
-25

Valor RSSI para de la trama entre ND y NR1
-25

Valor RSSI para de la trama entre ND y NR1
-25

fx >>
```

Figura 33: Valor RSSI de una trama API.

Definido el valor RSSI de la comunicación entre el ND y el NR1, se realiza el mismo procedimiento para obtener el valor RSSI entre el ND y el NR2. Con los valores anteriores es posible ejecutar el algoritmo de posicionamiento descrito en la técnica de angulación, el código que describe el algoritmo de posicionamiento se muestra en el apéndice A, sección 6.

3.3.4 Diseño general del sistema de posicionamiento empleando ZigBee

Establecidos cada uno de los nodos que conforman el sistema, es posible plantear el diseño general del sistema de posicionamiento en interiores empleando la tecnología ZigBee, mostrado en la Figura 34.

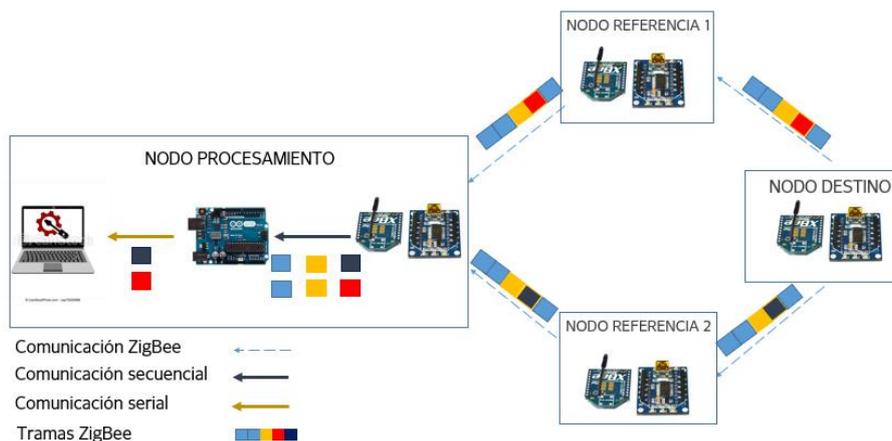


Figura 34: Diseño general del sistema de posicionamiento empleando ZigBee.

Con el diseño general establecido y los nodos conformados es posible realizar pruebas de funcionamiento general, que consisten en ubicar los nodos dentro de un escenario cerrado y ejecutar el sistema, los resultados obtenidos se presentan en la Figura 35.

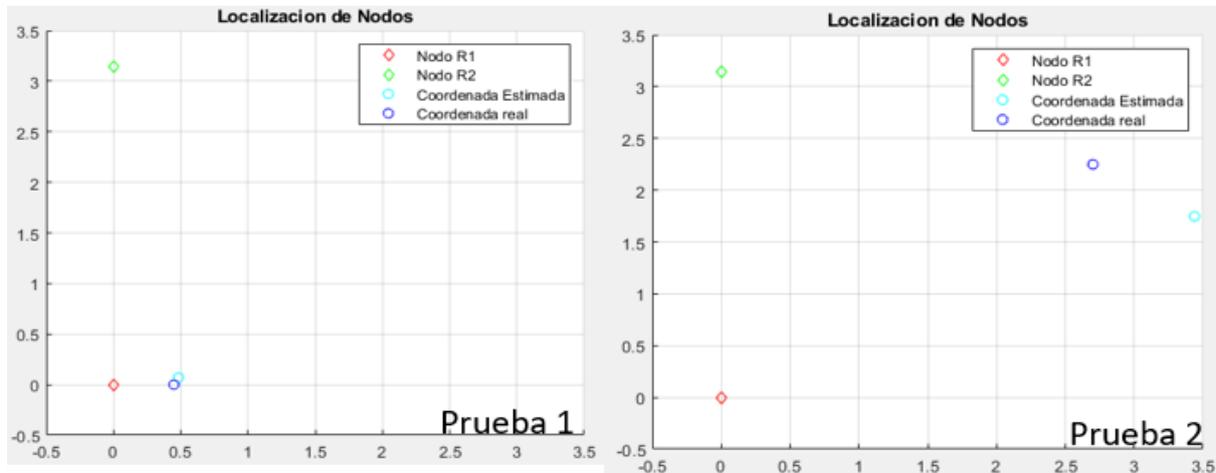


Figura 35: Pruebas iniciales del sistema.

En la prueba 1 se establece que el sistema localizo de forma adecuada al usuario, ya que la coordenada estimada se encuentra muy próxima a la coordenada real, sin embargo, en la prueba 2, se evidencia como hay un error de medición entre la coordenada estimada y la coordenada real, esto sucede por factores y parámetros que alteran el funcionamiento y ejecución del sistema. Por ello es necesario calibrar parámetros que permitan la adaptación del sistema a los escenarios cerrados.

Para la implementación del sistema de posicionamiento es necesario realizar una calibración del sistema y calibración del escenario que permita generalizar parámetros que influyen en el funcionamiento y ejecución. Algunos parámetros que se deben tener en cuenta son, el modelo de propagación, la altura de los dispositivos, el número de muestras, el tipo de muestra, entre otros. Estas calibraciones toman como criterio de evaluación el error de medición que se define como la distancia euclidiana entre un punto estimado y un punto real. Realizar estas calibraciones permiten obtener una mejor exactitud del sistema.

3.3.5 Ajuste del modelo de propagación

El modelo de propagación depende directamente del entorno de posicionamiento y de las pérdidas generadas por diferentes factores, para este caso, se va a emplear un escenario cerrado, por ende, se deben establecer los parámetros mencionados en(18), específicamente el exponente de propagación n y el valor de la intensidad de la señal a un metro de distancia A . Para realizar esta calibración, inicialmente se calcula de forma experimental el valor de A , donde, se utiliza el escenario de la Figura 36, donde se ubica un NR en cada esquina separado por una distancia de 1 m a un ND, de manera que intercambien tramas y se pueda obtener el valor RSSI de la comunicación. Como el escenario se ve afectado por diferentes elementos como ventanas, pasillos, puertas y escaleras, la medición del valor RSSI se realiza en distintos puntos para garantizar que el valor obtenido sea el adecuado para cualquier punto dentro del escenario.

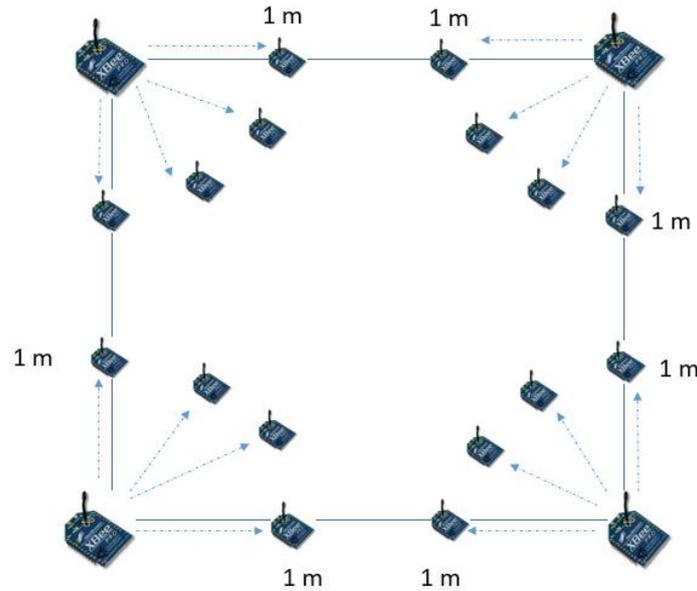


Figura 36: Calibración para valor de A .

En cada punto se toman 50 muestras del valor RSSI, esto genera un total de 800 valores RSSI muestreados sobre el escenario. Para obtener el valor de A , se promedian estos valores dando como resultado -28 dBm. Este valor se tendrá en consideración para las siguientes calibraciones.

El exponente de propagación para interiores varía dependiendo del escenario y diferentes elementos que influyen dentro de los sistemas, diferentes autores definen este valor entre 1,8 y 2,9 [41], sin embargo, para obtener un valor que se ajuste a los dispositivos y al escenario, se plantea una prueba de distancia descrita en la Figura 37, donde se ubica un nodo referencia en la posición inicial y un ND se desplaza cada 0,45 m hasta 3,6 m, en cada punto de medida se obtiene un promedio del valor RSSI y se varía el valor de n para observar su comportamiento.

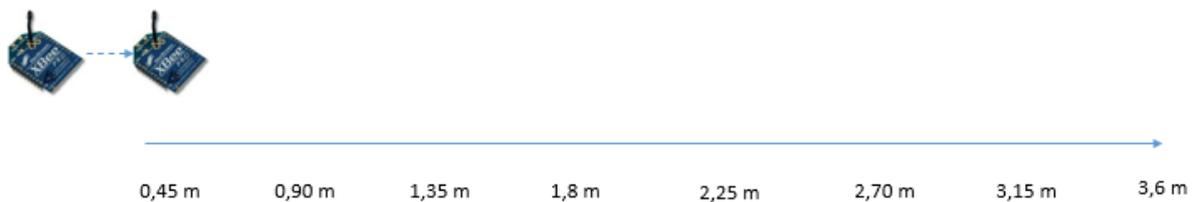


Figura 37: Estimación del valor de n .

Sobre cada punto de medida se toman 50 datos y se promedian para obtener el valor RSSI, este valor se incluye en (19) donde corresponde a $RSSI$ (dBm), A (dBm) = -28 y n varía con valores entre 1,8 y 2,9. Los resultados se presentan en la Tabla 14.



Tabla 14: Cálculo de distancias variando n .

Distancia (m)	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7	3,15	3,6	Error promedio (m)
Valor RSSI	-20,4	-21,3	-27,7	-28,8	-32,5	-34,9	-39,1	-39,8	
Distancia con $n = 1,8$	0,6309	0,7079	1,6052	1,8478	2,9663	4,0323	6,9006	7,5470	
Error de medición (m)	0,1809	0,1921	0,2552	0,0478	0,7163	1,3323	3,7506	3,947	1,858
Distancia con $n = 2$	0,6609	0,7328	1,5310	1,7378	2,6607	3,5075	5,6885	6,1659	
Error de medición (m)	0,2188	0,1672	0,1810	0,0622	0,4107	0,8075	2,5385	2,5659	0,6646
Distancia con $n = 2,3$	0,6973	0,7631	1,4483	1,6169	2,3418	2,9779	4,5344	4,8635	
Error de medición (m)	0,2473	0,1369	0,0983	0,1831	0,0918	0,2779	1,3844	1,2635	0,3558
Distancia con $n = 2,6$	0,7513	0,8070	1,3414	1,4639	1,9638	2,3760	3,3165	3,5061	
Error de medición (m)	0,3013	0,0930	0,0086	0,3361	0,2862	0,324	0,1665	0,0939	0,2012
Distancia con $n = 2,9$	0,7270	0,7873	1,3877	1,5297	2,1228	2,6256	3,8086	4,0522	
Error de medición (m)	0,2770	0,1127	0,0377	0,2703	0,1272	0,0744	0,6586	0,4522	0,2262

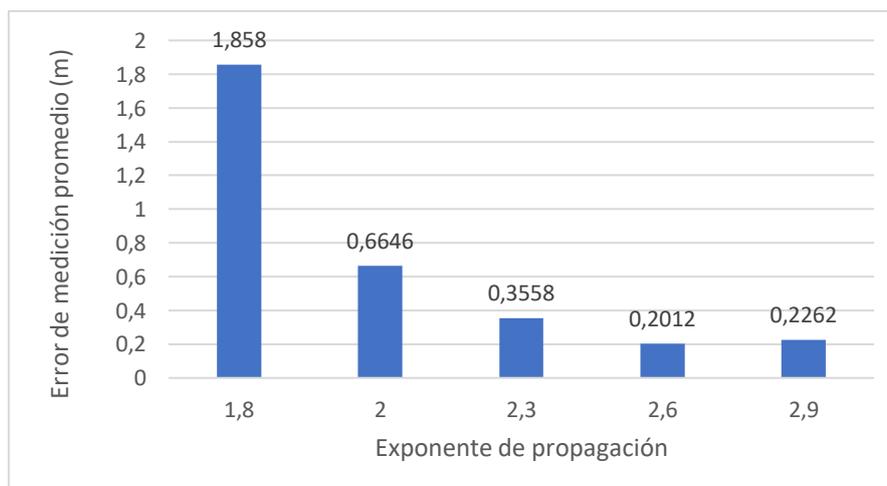


Figura 38: Error de medición en prueba de variación de n .



En la Figura 38 se pueden observar los resultados obtenidos en la Tabla 14, se evidencia que el error promedio se encuentra distribuido entre 0,2012 y 1,858 m, un valor promedio para posicionamiento en interiores. El valor de n que presenta menor error promedio es 2,6, sin embargo, el error de medición no es constante, ya que para la distancia de 1,35 m, su error se sitúa en el rango de los milímetros, mientras que para el valor de 1,8 m, su error es superior a los 30 cm, lo que genera una variación considerable entre los resultados, además, su valor es muy semejante al obtenido por 2,9. Esto sucede porque no se tienen en cuenta los elementos que rodean y afectan el escenario, además, de tomar un número reducido de muestras. Para establecer un valor de n apropiado, teniendo en cuenta factores como el entorno y número de muestras, se propone el escenario de la Figura 39 que cuenta con dimensiones 3 x 3 m y tiene características semejantes al escenario de configuración para A.

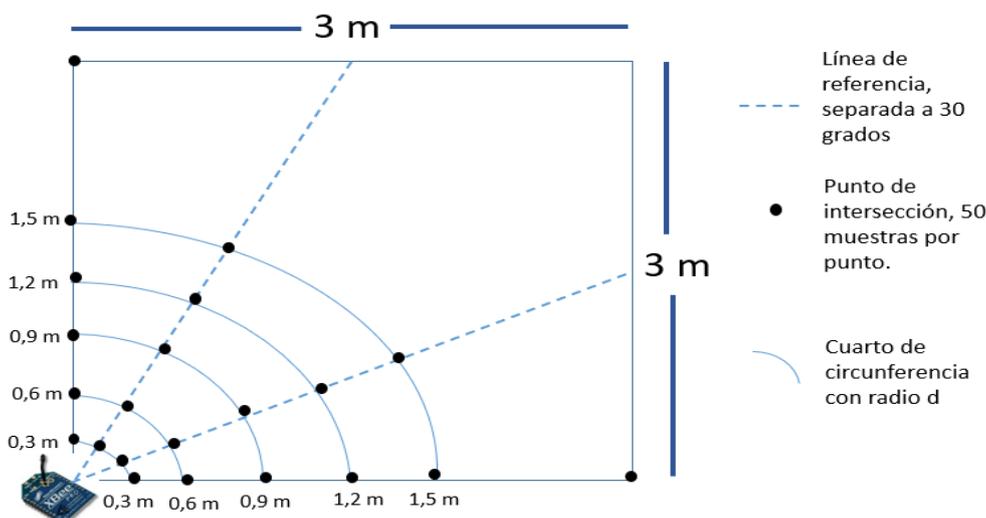


Figura 39: Calibración de n para una esquina.

La prueba consiste en ubicar un NR en una esquina del entorno como se observa en la figura anterior, el nodo destino se desplaza cada 30 cm, pero para este caso, el ND no solo se moverá de forma lineal, si no también formando un cuarto de circunferencia donde el radio es la distancia entre los nodos. Sobre cada cuarto de circunferencia se establecen dos líneas imaginarias que atraviesan el entorno, separadas por un ángulo de 30 grados, los puntos de intersección entre el cuarto de circunferencia y las líneas, se denominan puntos de muestreo, en estos puntos se toman 50 valores RSSI de la comunicación entre el ND y el NR. Al realizar este proceso para cada distancia medida (0,3 , 0,6 , 0,9 , ...,3 m) se toman 4 puntos de medida en diferente dirección, lo que genera que para cada punto se tomen 200 medidas por cada distancia.

No obstante, al realizar solo esta prueba se desconocen los efectos que se generan al tomar las medidas desde otras direcciones, por esto se decide ejecutar el mismo procedimiento desde las demás esquinas del entorno, esta calibración se muestra en la Figura 40.

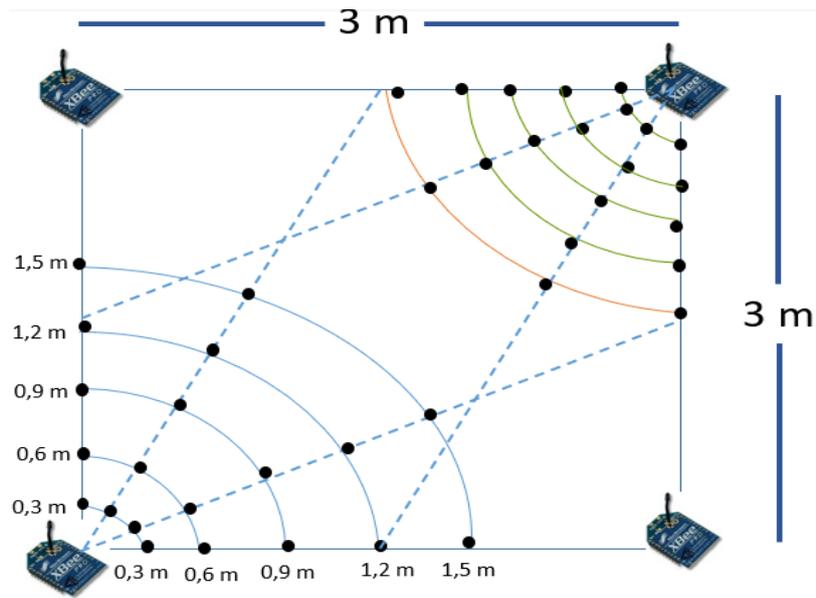


Figura 40: Calibración de n para las 4 esquinas del entorno.

Con la calibración anterior se obtiene un promedio de 800 valores RSSI medidos para cada distancia, lo que repercute en 8000 valores RSSI totales sobre el escenario, la Figura 41 muestra la gráfica que describe el comportamiento de n variando la distancia, en esta se puede observar el valor promedio de n con respecto a las pruebas realizadas, además, de presentar los diferentes valores que puede tomar n y sus distancias correspondientes.

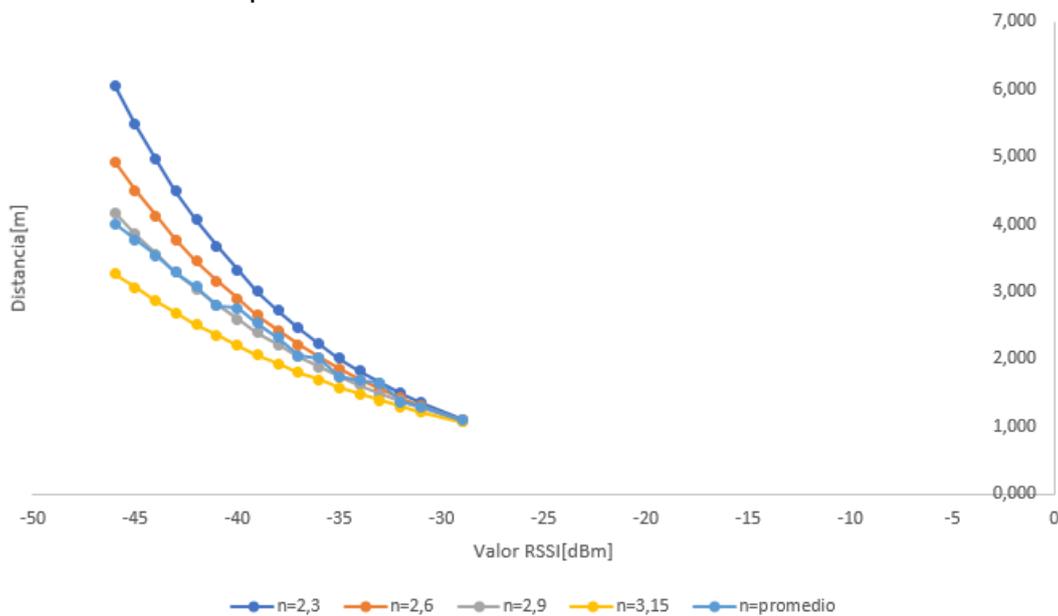


Figura 41: Análisis de factor de atenuación.

El valor teórico que más se ajusta al valor obtenido mediante las pruebas realizadas, es el de la curva gris con $n = 2,9$. La cantidad de datos procesados garantiza que el valor de n sea el adecuado para los escenarios en interiores, el escenario descrito en la Figura 40 servirá como escenario de calibración para las pruebas posteriores.



3.3.6 Calibración de número de muestras

Establecido el modelo de propagación, se varían diferentes factores que influyen en el sistema y el entorno, una de ellas consiste en determinar cuál es el número de muestras apropiadas para establecer de forma adecuada la posición de un usuario dentro del escenario. Para esto se realiza una prueba de calibración que radica en muestrear 10 puntos aleatorios dentro del escenario, sobre cada punto tomar un número de muestras que varía desde las 10 hasta las 30 muestras y analizar el comportamiento del error de medición entre las coordenadas reales y las estimadas, los resultados se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15: Calibración para número de muestras.

Punto	Real	10 muestras	Error	20 muestras	Error	30 muestras	Error
1	(0,9 , 1,8)	(1,27 , 2,14)	0,510	(1,01 , 2,01)	0,240	(0,78 , 2,14)	0,365
2	(0,45 , 0)	(0,49 , 0,32)	0,328	(0,44 , 0,36)	0,365	(0,69 , 0,49)	0,492
3	(1,8 , 0,45)	(1,66 , 0,58)	0,188	(1,98 , 0,56)	0,216	(2,23 , 0,08)	0,567
4	(2,7 , 2,25)	(3,01 , 1,25)	0,312	(2,10 , 1,24)	0,598	(3,69 , 1,26)	0,998
5	(1,35 , 2,7)	(1,56 , 2,89)	0,292	(1,46 , 2,95)	0,286	(1,69 , 2,26)	0,556
6	(0,9 , 0,9)	(0,98 , 1,31)	0,423	(0,79 , 0,67)	0,248	(0,69 , 1,36)	0,510
7	(0 , 1,8)	(0,35 , 1,78)	0,359	(0,32 , 1,89)	0,340	(0,98 , 1,78)	0,984
8	(2,25 , 2,7)	(2,06 , 2,98)	0,339	(2,15 , 2,69)	0,095	(2,25 , 2,98)	0,284
9	(0,45 , 2,7)	(0,65 , 2,97)	0,339	(0,39 , 2,89)	0,203	(0,45 , 2,69)	0,109
10	(2,25 , 1,8)	(2,54 , 1,98)	0,344	(2,25 , 1,98)	0,187	(2,24 , 1,89)	0,099
Promedio de error			0,343		0,278		0,496

Basándose en la tabla 15 se nota como al realizar 30 muestras, se presenta el error de medición más grande, aproximadamente 0,5 m, esto se debe al procesamiento ejecutado por el sistema, ya que entre mayor sea el número de puntos medidos, el sistema emplea más tiempo en procesar los datos y proporcionar resultados. Al tomar una cantidad limitada de puntos de medida se corre el riesgo de que los datos obtenidos presenten errores, puesto que una variación en el sistema o en el escenario afectará de forma considerable la estimación de la posición, esto sucede con las 10 muestras, su error de medición no es el máximo pero al realizar una cantidad tan limitada de datos, la información obtenida no es la mejor, caso contrario sucede con tomar 20 muestras, ya que es una cantidad considerable donde se obtiene el menor error de medición y en el acontecimiento de tomar un dato erróneo, este se puede corregir mediante los demás datos. Por esto se determina que la cantidad adecuada para estimar la posición de un usuario es 20 muestras.



3.3.7 Calibración tipo de muestra

Para el desarrollo de las configuraciones anteriores se ha empleado el promedio de las muestras para establecer los parámetros, sin embargo, RSSI es una métrica que se afecta por los valores pico, por esto, es necesario determinar qué tipo de muestra garantiza un mejor desempeño dentro del escenario, para ello se compara el promedio y la moda de los datos obtenidos. Se evalúan 10 puntos dentro del escenario, en cada punto se toman 20 muestras y se estima la posición mediante el promedio y la moda. los resultados de esta calibración se visualizan en la Tabla 16.

Tabla 16: Calibración para tipo de muestras.

Punto	Real	Promedio	Error	Moda	Error
1	(0,9 , 1,8)	(1,11 , 1,98)	0,278	(0,69 , 1,98)	0,273
2	(0,45 , 0)	(1,43 , 0,12)	0,997	(0,75 , 0,12)	0,334
3	(1,8 , 0,45)	(2,01 , 0,63)	0,281	(1,69 , 0,69)	0,268
4	(2,7 , 2,25)	(2,54 , 1,63)	0,411	(3,25 , 1,62)	0,673
5	(1,35 , 2,7)	(1,69 , 2,69)	0,348	(1,79 , 2,96)	0,520
6	(0,9 , 0,9)	(1,03 , 0,88)	0,137	(0,59 , 0,98)	0,313
7	(0 , 1,8)	(0,21 , 1,79)	0,216	(0,45 , 1,98)	0,495
8	(2,25 , 2,7)	(2,36 , 2,69)	0,119	(2,36 , 3,02)	0,341
9	(0,45 , 2,7)	(0,44 , 2,98)	0,286	(0,98 , 2,98)	0,607
10	(2,25 , 1,8)	(2,01 , 1,76)	0,240	(2,25 , 1,88)	0,089
Promedio de error			0,331		0,391

Analizando la tabla anterior es posible identificar como ambos tipos de muestra presentan un error de medición similar, esto demuestra una coherencia en el procesamiento de los datos, ya que la moda se define como el valor que se repite con mayor frecuencia en un conjunto de datos, mientras que el promedio, es el valor medio esperado de un suceso que se repite en múltiples ocasiones, esto quiere decir que los datos obtenidos presentan un alto grado de uniformidad, sin embargo, por presentar el error de medición más bajo, se selecciona el promedio como tipo de muestra para procesar los datos obtenidos.

3.3.8 Calibración de altura de los dispositivos

Las señales RSSI son vulnerables a cambios mínimos dentro de los entornos, un factor a considerar es la altura donde se encuentran los dispositivos, por esto se realiza una prueba de calibración para establecer la altura más conveniente que estime la posición de un usuario. Se analizan 3 tipos de alturas: a nivel de suelo; a la altura de bolsillo, aproximadamente 70 cm y a la altura promedio de sostener un



dispositivo móvil, que se encuentra cerca de los 110 cm. Los resultados se presentan en la

Tabla 17.

Tabla 17: Calibración para altura de dispositivos.

Punto	Real	0 cm	Error	70 cm	Error	110 cm	Error
1	(0.9 , 1.8)	(1,32 , 1,36)	0,608	(0,99 , 1,79)	0,098	(0,79 , 1,92)	0,193
2	(0.45 , 0)	(0,69 , 0,56)	0,621	(0,69 , 0,26)	0,359	(0,74 , 0,12)	0,323
3	(1.8 , 0.45)	(2,69 , 1,45)	1,343	(1,99 , 0,67)	0,290	(2,68 , 0,78)	0,941
4	(2.7 , 2.25)	(2,21 , 1,69)	0,658	(2,87 , 1,65)	0,434	(2,15 , 1,02)	0,594
5	(1.35 , 2.7)	(1,89 , 3,26)	0,782	(1,45 , 2,97)	0,287	(1,98 , 2,64)	0,632
6	(0.9 , 0.9)	(0,62 , 2,65)	0,803	(0,79 , 0,98)	0,136	(0,45 , 1,23)	0,558
7	(0 , 1.8)	(0,65 , 1)	1,072	(0,02 , 1,65)	0,151	(0,45 , 1,98)	0,492
8	(2.25 , 2.7)	(2,06 , 3,41)	0,836	(2,16 , 2,55)	0,172	(3,65 , 1,69)	1,729
9	(0.45 , 2.7)	(0,12 , 3,69)	1,048	(0,67 , 2,63)	0,238	(1,61 , 2,74)	1,160
10	(2.25 , 1.8)	(2,98 , 2,49)	1,014	(2,31 , 1,88)	0,110	(2,25 , 1,89)	0,0940
Promedio de error			0,878		0,227		0,672

De acuerdo con lo expuesto en la tabla anterior se puede observar como el sistema emplazado a nivel de suelo presenta un error de medición significativo, esto sucede por la absorción ocasionada por el suelo que afecta de forma relevante las señales transmitidas por los dispositivos ZigBee. La altura a nivel de bolsillo obtiene el error de medición más bajo, ubicándose por debajo de los 0,3 m, este resultado se justifica porque la señal transmitida tiene menor vulnerabilidad con respecto a fenómenos físicos como la absorción y la reflexión.

3.3.9 Calibración disposición de antena

Los módulos XBee ZB S2C tienen incorporada una antena tipo cable que permite aumentar el rango de distancia, esto se logra porque la antena proporciona una ganancia de transmisión, además, las antenas de estos módulos tienen un patrón de radiación omnidireccional, sin embargo, por ser de cable, puede variar su orientación, por lo cual se debe determinar la disposición que brinde mejores resultados de posicionamiento. Para esta configuración se analizan tres orientaciones de antena, estas se observan en la Figura 42. Se evalúan 10 puntos dentro del escenario anteriormente descrito y se analizan los resultados mediante la Tabla 18 [42].

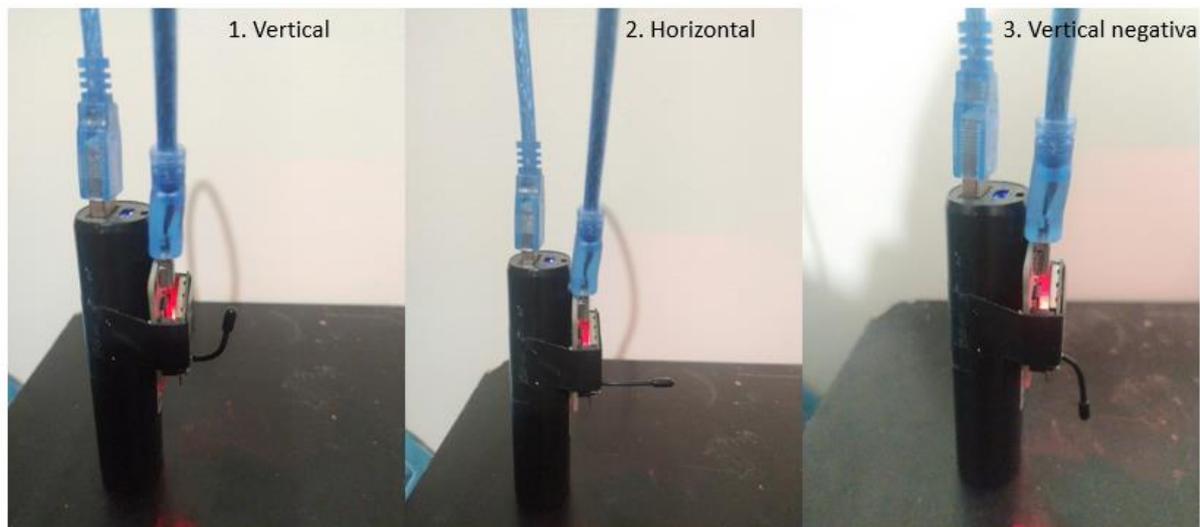


Figura 42: Disposición de antena.

Tabla 18: Calibración de disposiciones de antenas.

Punto	Real	Vertical	Error	Horizontal	Error	Vertical N.	Error
1	(0,9 , 1,8)	(0,82 , 1,79)	0,074	(1,02 , 1,28)	0,525	(1,59 , 2,17)	0,791
2	(0,45 , 0)	(0,43 , 0,15)	0,155	(0,78 , 0,35)	0,482	(0,98 , 0,58)	0,794
3	(1,8 , 0,45)	(1,97 , 0,57)	0,216	(1,54 , 0,98)	0,593	(0,94 , 0,64)	0,876
4	(2,7 , 2,25)	(2,66 , 1,58)	0,331	(2,64 , 0,96)	0,292	(3,15 , 1,98)	0,867
5	(1,35 , 2,7)	(1,58 , 3,06)	0,436	(1,65 , 2,90)	0,364	(1,01 , 2,31)	0,510
6	(0,9 , 0,9)	(1,14 , 0,74)	0,289	(0,88 , 1,02)	0,122	(1,56 , 0,49)	0,778
7	(0 , 1,8)	(0,34 , 2,14)	0,490	(0,13 , 2,01)	0,254	(0,25 , 1,54)	0,366
8	(2,25 , 2,7)	(2,01 , 2,08)	0,656	(2,36 , 2,98)	0,306	(2,69 , 2,16)	0,694
9	(0,45 , 2,7)	(0,45 , 2,69)	0,006	(0,68 , 2,78)	0,253	(0,89 , 1,98)	0,842
10	(2,25 , 1,8)	(2,25 , 1,79)	0,001	(2,34 , 1,89)	0,136	(2,47 , 1,62)	0,290
Promedio de error			0,265		0,333		0,681

Tomando como referencia lo mostrado en la Tabla 18, es posible identificar como la disposición vertical presenta el menor error de medición, esto se evidencia porque las antenas de los módulos ZigBee irradian y reciben mejor señal perpendicular a la dirección que apuntan, por lo que el patrón de radiación omnidireccional de una antena con disposición vertical brinda una señal más fuerte y estable [42], por esto se emplea la disposición vertical para estimar la posición.



3.3.10 Calibración para ubicación de nodos referencia

Determinar la posición adecuada para los nodos referencia es de gran importancia, ya que el sistema se encuentra en un escenario afectado por diferentes elementos que causan perturbación de la señal, por lo tanto se plantea la prueba de calibración donde se varía la ubicación de los NR, consiste en ubicar los nodos en diferentes coordenadas y observar el comportamiento del sistema, se emplea el escenario descrito para las calibraciones anteriores, para este caso, los nodos se ubican en los recuadros de las posiciones ilustradas en la Figura 43. Para determinar cuál posición es adecuada, se estima la posición de 10 puntos aleatorios desde las diferentes ubicaciones.

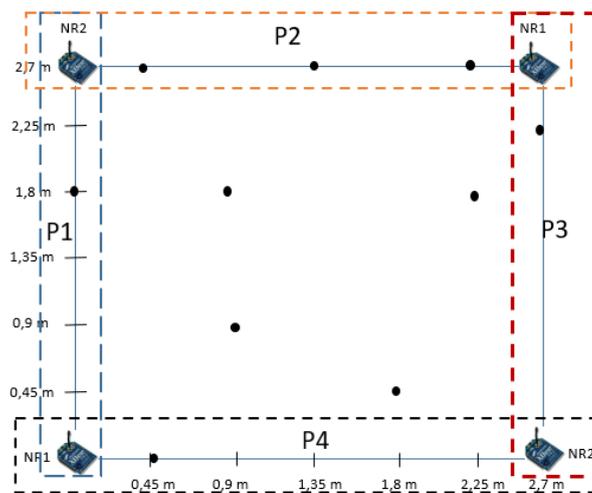


Figura 43: Calibración ubicación de nodos referencia.

Se establecen 4 ubicaciones para esta prueba de calibración, la posición 1 plantea las coordenadas para el NR1 y NR2 en (0 , 0) y (0 , 2,7) respectivamente, la segunda configuración ubica los nodos en la posición 2 con las coordenadas en (0 , 2,7) y (2,7 , 2,7), la tercera configuración se sitúa sobre la posición 3 y establece los nodos en las coordenadas (2,7 , 0) y (2,7 , 2,7), la posición 4 se emplaza sobre las coordenadas (0 , 0) y (2,7 , 0). Los resultados de esta calibración se aprecian en la Tabla 19.

Tabla 19: resultados variando nodos referencia.

Punto	Real	P1	Error	P2	Error	P3	Error	P4	Error
1	(0,9 , 1,8)	(1,26 , 2,16)	0,509	(0,78 , 2,12)	0,341	(0,79 , 2,13)	0,347	(0,79 , 1,51)	0,310
2	(0,45 , 0)	(0,51 , 0,36)	0,364	(0,02 , 0,45)	0,622	(0,66 , 0,43)	0,479	(0,54 , 0,31)	0,322
3	(1,8 , 0,45)	(1,59 , 0,54)	0,228	(2,21 , 0,64)	0,451	(2,21 , 0,39)	0,414	(1,78 , 0,36)	0,092
4	(2,7 , 2,25)	(2,98 , 2,27)	0,280	(2,94 , 1,14)	0,264	(2,84 , 1,27)	0,141	(2,29 , 1,21)	0,411
5	(1,35 , 2,7)	(1,42 , 2,79)	0,114	(1,47 , 2,31)	0,408	(1,7 , 2,65)	0,353	(1,42 , 2,63)	0,098
6	(0,9 , 0,9)	(0,92 , 1,41)	0,510	(0,54 , 1,01)	0,376	(0,84 , 1,41)	0,513	(0,54 , 1,25)	0,502
7	(0 , 1,8)	(0,31 , 1,63)	0,353	(0,25 , 1,94)	0,286	(0,36 , 1,58)	0,421	(0,84 , 1,64)	0,855
8	(2,25 , 2,7)	(2,03 , 2,74)	0,223	(1,97 , 2,35)	0,448	(2,37 , 3,12)	0,436	(2,16 , 2,48)	0,237



9	(0,45 , 2,7)	(0,62 , 3,14)	0,472	(0,31 , 2,74)	0,145	(0,64 , 2,85)	0,242	(0,01 , 2,97)	0,516
10	(2,25 , 1,8)	(2,26 , 1,92)	0,120	(2,25 , 1,81)	0,01	(2,24 , 1,91)	0,110	(2,23 , 1,78)	0,028
Promedio de error			0,31 7		0,33 5		0,34 6		0,33 7

En la tabla anterior se observa un comportamiento uniforme del sistema, las 4 posiciones proporcionan una estimación adecuada, esto sugiere que el sistema se puede desplegar desde cualquier ubicación, sin embargo, para la ejecución, se selecciona la posición 1 ya que presenta el menor error de medición en comparación a los demás.

Establecidos y configurados los parámetros más relevantes del sistema de posicionamiento en interiores empleando ZigBee, se procede a realizar la evaluación del sistema en diferentes escenarios.

3.4 Evaluación del desempeño

Para la evaluación del sistema de posicionamiento se debe seleccionar un escenario cerrado ubicado dentro de una casa familiar, este escenario estará rodeado por diferentes elementos como puertas, pasillos, ventanas, escaleras, entre otros. Para analizar la exactitud del sistema se parte de una prueba inicial con las calibraciones establecidas anteriormente, sobre el escenario no habrá ningún tipo de presencia, se procura establecer un escenario ideal, donde se genere la menor cantidad de pérdidas posibles, esta prueba constituye la base del experimento para observar el comportamiento de la tecnología ZigBee en escenarios cerrados.

La siguiente prueba consiste en integrar la presencia humana dentro del escenario, para esto, un usuario porta el nodo destino y finalmente, se propone la prueba de bolsillo, que consiste en llevar el dispositivo dentro de un bolsillo del usuario a localizar, Para realizar estas tres pruebas se seleccionan dos escenarios cerrados, la descripción de los escenarios se muestran en la Tabla 20.

Para determinar la exactitud del sistema, se establece como criterio de evaluación el error promedio de medición entre las coordenadas estimadas y las coordenadas reales, para escenarios cerrados el error promedio máximo de medición aceptado es de 1 m, además, de la desviación estándar que denota la dispersión de los datos con respecto a su valor promedio.

Tabla 20: Descripción de escenarios.

Entorno	Escenario 1	Escenario 2
Dimensiones	3,15 x 2,7 m	7,54 x 2,9 m
Identificador	ESC1	ESC2
Área	8,505 m ²	21,866 m ²



Ubicación	Sala	Patio
Puntos muestreados	50	86
Características	Presencia de ventanas, puertas, escaleras y objetos de decoración.	Presencia de puertas, ventanas, matas ornamentales, escaleras, etc.

3.4.1 Pruebas sobre escenario ESC1

Este escenario se encuentra en la sala de un segundo piso de una casa familiar, cuenta con diferentes elementos como puertas, ventanas y objetos de decoración como se ilustra en la Figura 44, el escenario es rectangular y se afecta por fenómenos físicos como la absorción en las paredes y pisos, la reflexión en las ventanas y objetos, entre otros.



Figura 44: Escenario ESC1.

Sobre este escenario se escogen 50 puntos de medida distribuidos como se observa en la Figura 45, cada punto está separado una distancia de 45 cm, los nodos referencia NR1 y NR2 se encuentran en las coordenadas (0 , 0) y (0 , 3,15) respectivamente.

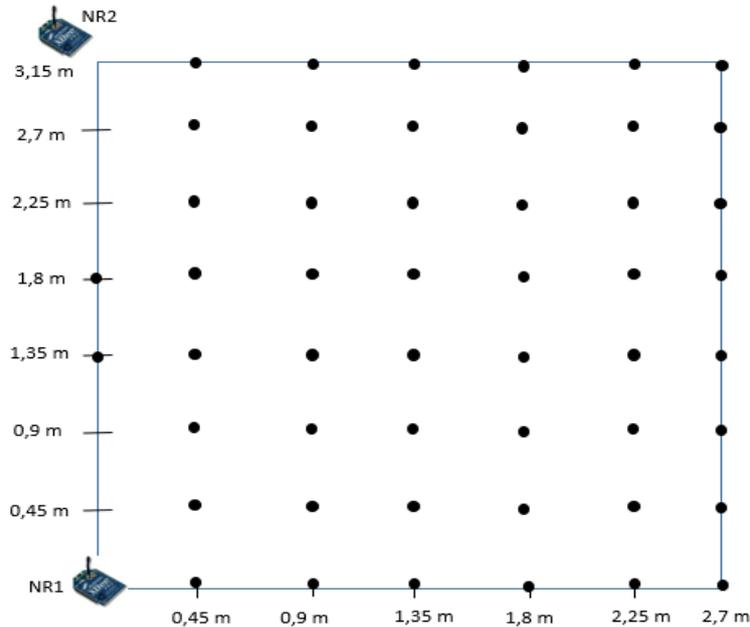


Figura 45: Distribución de puntos para primer escenario.

- **Prueba P1.1 – ESC1**

La prueba P1.1 – ESC1 consiste en muestrear el escenario de forma ideal, tratando de eliminar la mayor cantidad de pérdidas dentro del escenario. Una vez realizada la prueba P1.1 sobre el ESC1, los resultados se visualizan en la Figura 46, donde se comparan los puntos estimados y los puntos reales.

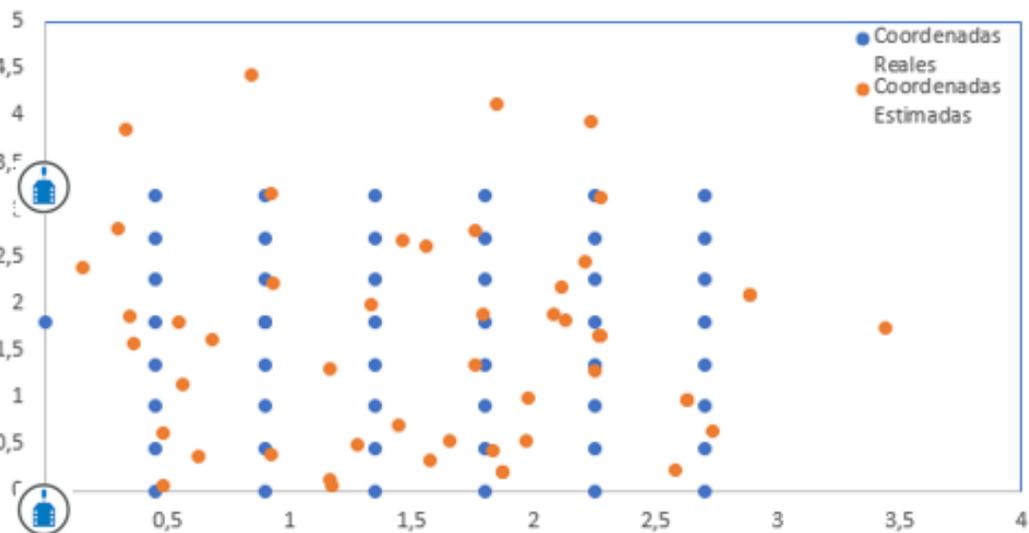


Figura 46: Resultados de la prueba P1.1 en escenario ESC1.

Para esta prueba se obtiene un error promedio de 0,507 m y una desviación estándar de 0,307 m, este resultado muestra una dispersión muy baja con respecto al error promedio. El punto que obtuvo la mayor exactitud fue la coordenada (0,9 , 3,15) con un error de medición de 24,1 mm y la coordenada con el error más significativo fue (2,7 , 3,15) con un error de 1,41 m, sin embargo, en la Figura 46 no



es posible apreciar bien los resultados logrados, ya que no se puede identificar cuáles son los puntos comparados, por esto se realiza un mapa de calor que representa el error de exactitud para cada coordenada estimada. En la Figura 47 se representa con color el error de medición entre cada punto, entre más exactitud presente el punto estimado, el color será rojo, caso contrario sucede cuando hay un error considerable, el color tomará un tono verde.

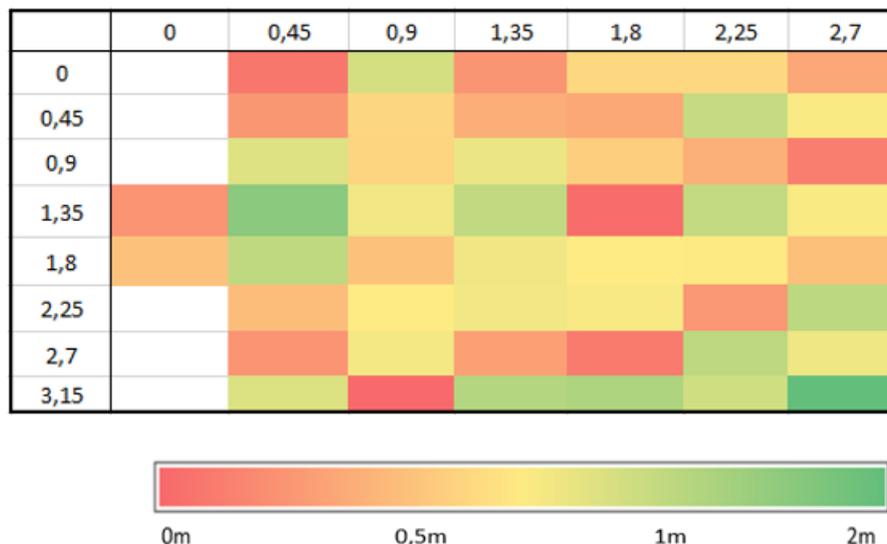


Figura 47: Mapa de calor para prueba P1.1 en escenario ESC1.

El mapa permite determinar que hay una gran cantidad de puntos con un error bajo, además, es posible identificar celdas que se encuentran cerca de la media obtenida, esto corrobora que la dispersión del error es muy baja.

Para analizar los resultados obtenidos es necesario estudiar la Función de Densidad de Probabilidad (PDF, *Probability Density Function*) que se define como la frecuencia relativa de ocurrencia de que un valor se encuentre dentro de un intervalo de datos y la Función de Distribución Acumulativa (CDF, *Cumulative Distribution Function*) que describe la probabilidad de que una variable aleatoria sea menor o igual a un determinado valor. La PDF y la CDF se desarrollan con el error de medición promedio obtenido para cada prueba.

La Figura 48 describe la frecuencia relativa de ocurrencia de datos obtenidos mediante intervalos, en esta se puede identificar como el error promedio se agrupa entre los intervalos de 0,4 y 0,6 m, con una probabilidad de 0,3 y una ocurrencia equivalente a 15 datos, además, la probabilidad de que un dato obtenido se encuentre entre el rango de 0 y 0,6 m es de 0,7. También se visualiza un error por encima del metro de distancia, sin embargo, su probabilidad es de 0,04 y su frecuencia es de apenas 2 datos. Para conocer la ocurrencia de los datos o las veces que se repiten los errores de medición y su respectiva probabilidad se realiza la Tabla 21, donde se muestran los intervalos de los errores de medición.

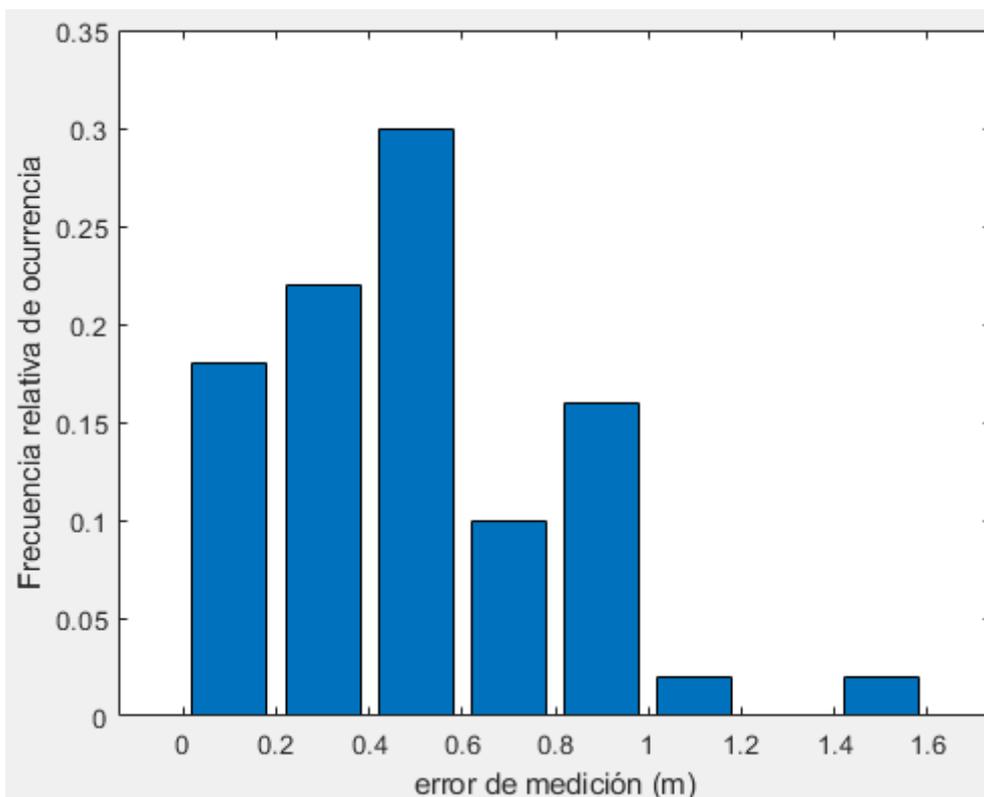


Figura 48: Función de Densidad de Probabilidad (PDF) para resultados de prueba P1.1.

Tabla 21: Resultados PDF para prueba P1.1.

Intervalo	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1	1-1,2	1,4-1,6
Frecuencia de ocurrencia	9	11	15	5	8	1	1
Probabilidad	0,18	0,22	0,3	0,1	0,16	0,02	0,02

La CDF del error promedio de la prueba P1.1 se presenta en la Figura 49, esta permite analizar la frecuencia de los datos y asocia su probabilidad de ocurrencia, esta grafica se encuentra en su forma discreta, además, mediante esta función es posible identificar una distribución semejante. Por ello se emplea el test de chi-cuadrado que analiza a que distribución se ajustan los resultados obtenidos, este test arroja dos variables, la primera consiste en comprobar si la hipótesis rechaza o acepta una determinada distribución y la probabilidad de ajuste que hay entre los datos y las distribuciones [43].

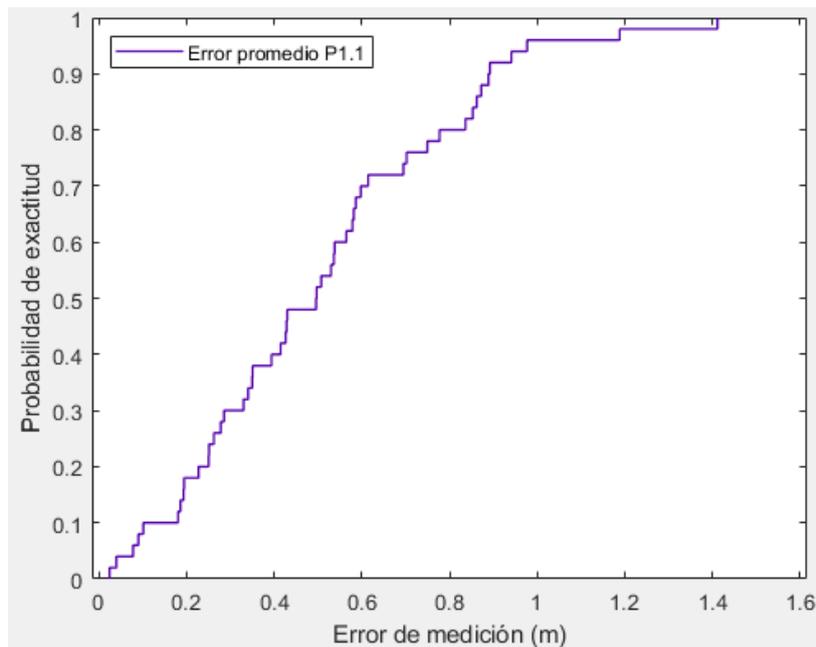


Figura 49: Función de Distribución Acumulativa (CDF) para prueba P1.1.

El test analiza tres distribuciones, la distribución normal, la distribución Weibull y la distribución log-normal. El resultado de la prueba se muestra en la Figura 50, donde se visualizan las tres distribuciones conformadas con los resultados, la gráfica detalla como la distribución log-normal es rechazada, mientras que la distribución normal es aceptada con una probabilidad de 0,45 sin embargo, la distribución Weibull presenta los mejores resultados porque su hipótesis es aceptada con una probabilidad de 0,95 [44].

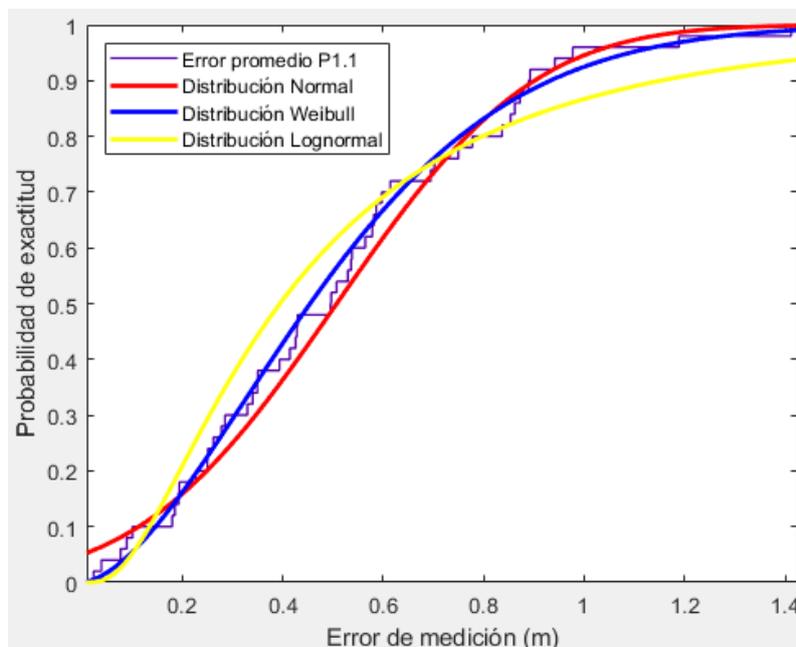


Figura 50: Test chi-cuadrado para P1.1.



En la Figura 50 es posible observar como la curva azul que identifica la Distribución Weibull, se ajusta de mejor manera a los resultados obtenidos, por esto, para el análisis de la exactitud sobre este escenario, se emplea la distribución Weibull.

Generalmente en el posicionamiento en interiores se busca obtener niveles altos de exactitud, esto depende directamente del tamaño del escenario y del tipo de sistema, entre más alta sea la probabilidad de obtener un error de medición menor a 1 m, el sistema será más confiable [44]. Por medio de la CDF es posible encontrar la probabilidad de que la exactitud en el error de medición de un punto medido sea menor a 1 m de distancia. Por medio de la CDF es posible analizar la exactitud del sistema, ya que está puede ser interpretada como la probabilidad de que el error de medición sea menor a un determinado valor, que para el caso de estudio, dicho valor se contempla en un metro. En la Figura 51 se analiza la CDF discreta y continua, en ellas se identifica que la probabilidad de obtener un error por debajo de 1 m es de 96% y 92,37%; para un error de 83 cm su probabilidad es de 80% y 85%, finalmente la probabilidad de obtener un error por debajo del error promedio es de 52% y 56%.

Estos resultados corroboran una estimación adecuada para el posicionamiento en interiores, ya que se presentan en un escenario ideal, sin embargo, es necesario analizar cómo influye la presencia humana y otros obstáculos en el sistema.

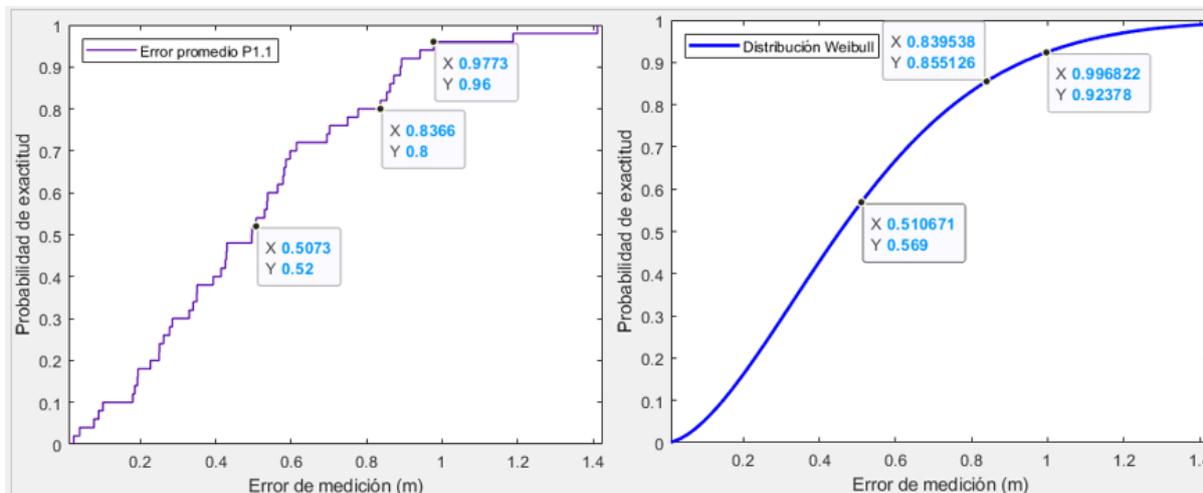


Figura 51: Probabilidades de error para análisis de exactitud prueba P1.1.

- **Prueba P1.2 – ESC1**

La prueba P1.2 tiene como propósito determinar el efecto de introducir la presencia humana dentro del escenario, para este fin, una persona porta el nodo destino a la altura de la cintura, se analizan los mismos puntos que en la prueba P1.1 y los resultados se presentan en la Figura 52. Para esta prueba se obtuvo un error promedio de 0,686 m y una desviación estándar de 0,462 m que denota un aumento en la dispersión de los datos con respecto a la media, el punto con mayor exactitud fue la coordenada (1,35 , 1,8) con un error de medición de 0,0566 m y el punto con menor exactitud fue (2,7 , 3,15) con un error de 2,281 m.

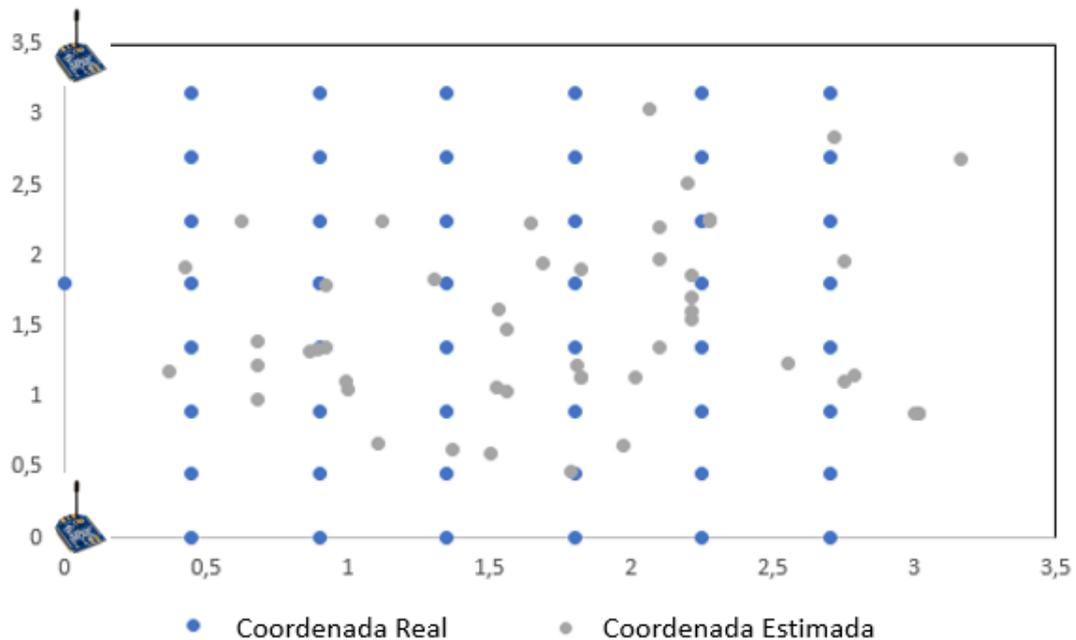


Figura 52: Resultados de la prueba P1.2 en escenario ESC1.

Para esta prueba se realiza un mapa de calor que identifica el comportamiento del error, en la Figura 53 es posible observar cómo los errores de medición se distribuyen alrededor del valor promedio, sin embargo, se pueden reconocer celdas con tonalidades rojas y naranjas que denotan un error menor o igual 0,5 m, también se observan algunas celdas con tono verde que representa un error mayor a 1 m, pero la cantidad de estas es baja.

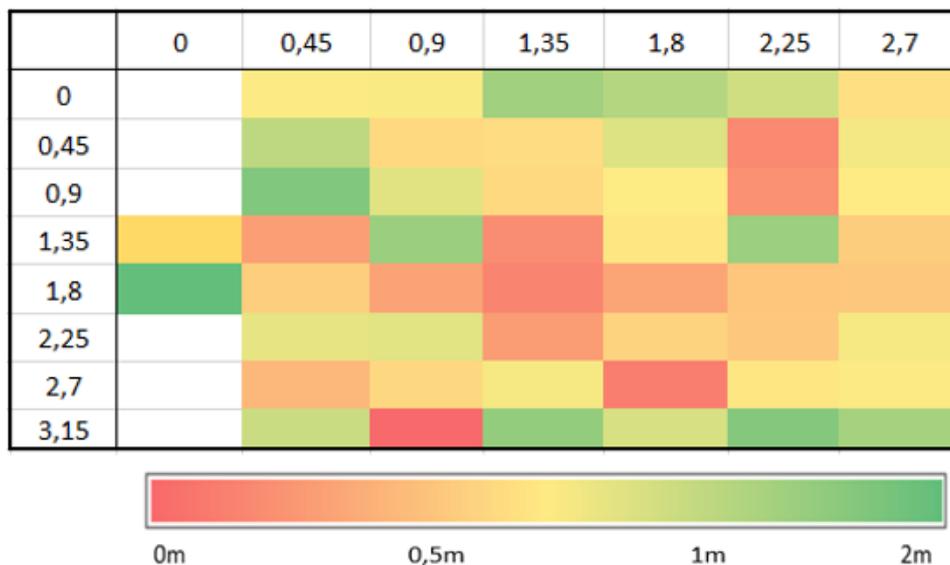


Figura 53: Mapa de calor para prueba P1.2 en escenario ESC1.



La PDF ilustrada en la Figura 54 para la prueba P1.2 que describe el comportamiento del error de medición mediante intervalos, detalla que la mayor densidad de datos se agrupa en el intervalo entre 0,3 y 0,6 m con una ocurrencia de 20 datos y una probabilidad de 0,4, también se puede notar como la probabilidad de obtener un dato por debajo de 0,9 m es del 80%, por consiguiente, los intervalos restantes tienen una ocurrencia de 10 datos y se distribuyen entre 1 y 2 m. los resultados de los intervalos con su respectiva frecuencia relativa de ocurrencia y probabilidad se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22: Resultados PDF para prueba P1.2.

Intervalo	0-0,3	0,3-0,6	0,6-0,9	0,9-1,2	1,2-1,5	1,5-1,8	1,8-2,1	2,1-2,4
Frecuencia de ocurrencia	6	20	14	3	3	1	2	1
Probabilidad	0,12	0,4	0,28	0,06	0,06	0,02	0,04	0,02

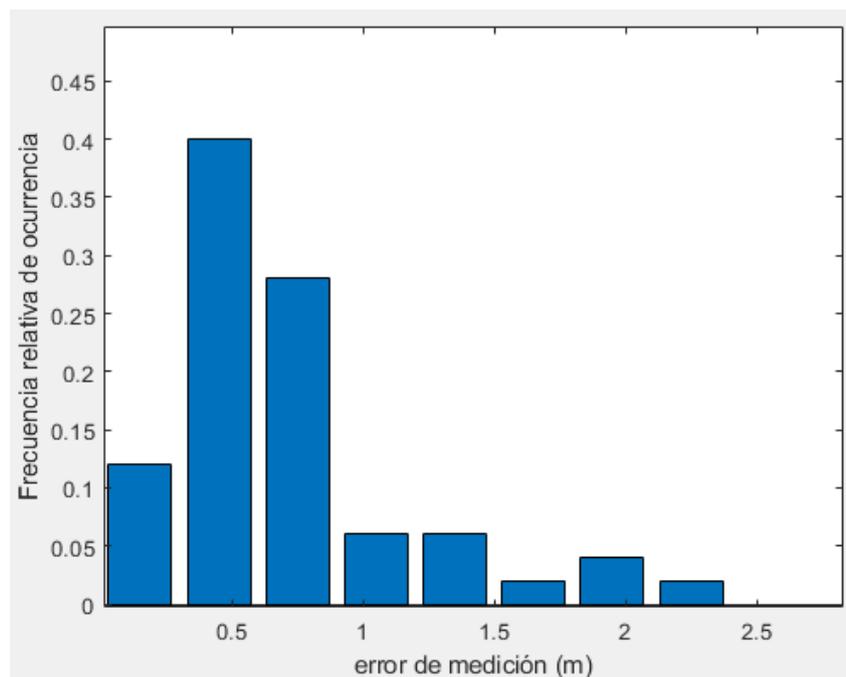


Figura 54: PDF para prueba P1.2.

Como se mencionó anteriormente, para analizar la exactitud del sistema se emplea la distribución Weibull, la comparación entre las CDF se presenta en la Figura 55, en esta se observa como decae la probabilidad de obtener un error por debajo de un metro. Por medio de la CDF discreta la probabilidad se sitúa sobre el 82% y para la distribución Weibull su porcentaje es de 78%, las probabilidades para obtener un error menor a la media obtenida es 62% y 55% respectivamente. Tomando como base la prueba P1.1, la exactitud decayó un 14%, esto sucede porque el cuerpo humano genera fenómenos físicos como la absorción y la reflexión que afectan la señal,



además, de que un humano puede emitir señales eléctricas que en dado caso pueden llegar a alterar las señales RSSI de los dispositivos.

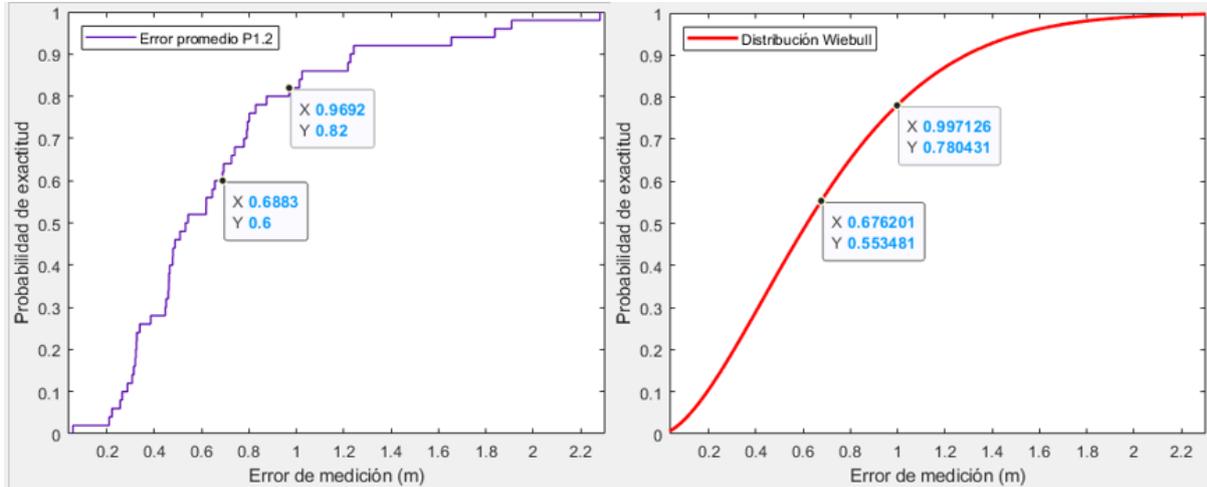


Figura 55: Probabilidades de error para análisis de exactitud prueba P1.2.

- **Prueba P1.3 – ESC1**

Esta prueba busca establecer la incidencia de obstruir la señal del nodo destino ubicando el dispositivo en una cavidad angosta y cerrada, para esto se propone la prueba P1.3 donde el usuario porta el nodo destino dentro de un bolsillo del pantalón, los resultados se presentan en la Figura 56.

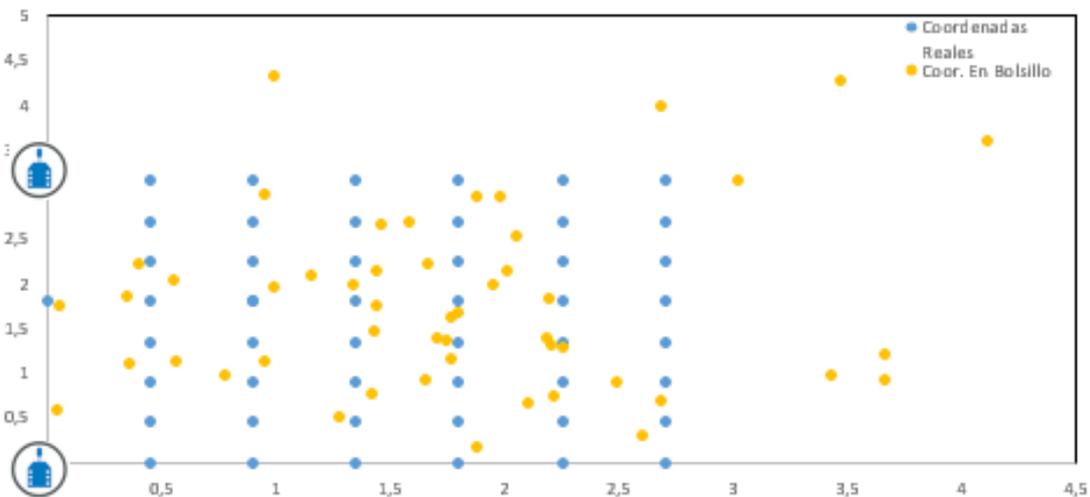


Figura 56: Resultados de la prueba P1.3 en escenario ESC1.

Esta prueba presenta los resultados con mayor error para este escenario, pues su error promedio es de 0,9947 m y su desviación estándar equivale a 0,392 m, lo que indica que se presenta una dispersión moderada. En la figura anterior es posible observar cómo hay puntos estimados muy por fuera del escenario de prueba, esto denota una cantidad amplia de errores significativos. El punto con mayor exactitud es la coordenada (1,8 , 2,7) con un error de 0,296 m y el punto con el error más grande es (0 , 1,8) con un error de 2,038 m, estos resultados se pueden evidenciar en el



mapa de calor de la Figura 57, donde se visualiza gran cantidad de celdas con un tono verde oscuro, demostrando que la mayoría de los errores se encuentran por encima de 1 m, sin embargo, también se pueden apreciar algunos puntos con un error de medición muy bajo, representados por celdas con tonos rojos.

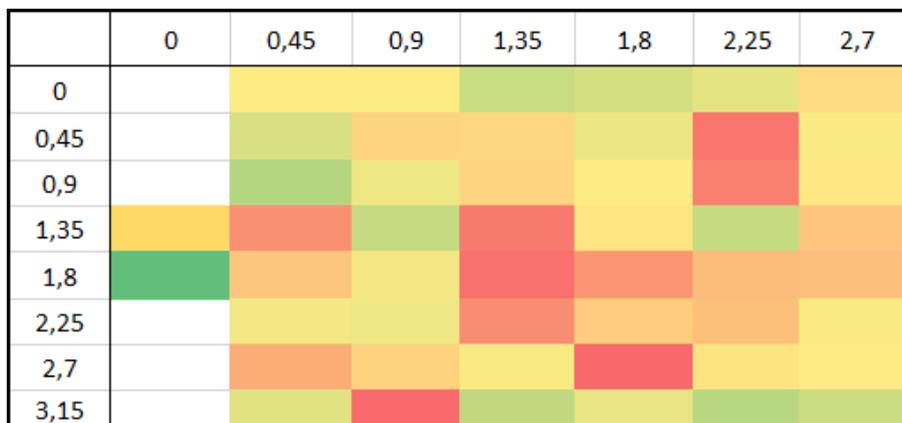


Figura 57: Mapa de calor para prueba P1.3 en escenario ESC1.

La PDF plasmada en la Figura 58, describe el comportamiento que tiene el error en la prueba P1.3, el intervalo entre 0,8 y 1,2 m agrupa la mayor ocurrencia de datos, este intervalo expone una frecuencia de ocurrencia de 23 datos y una probabilidad de 0,46, estos valores respaldan la media obtenida. La ocurrencia de datos que se encuentran por debajo de 1 m es de 24 con una probabilidad de 0,48, esto comprueba que la mayoría de los datos presenta un error mayor a 1 m de distancia.

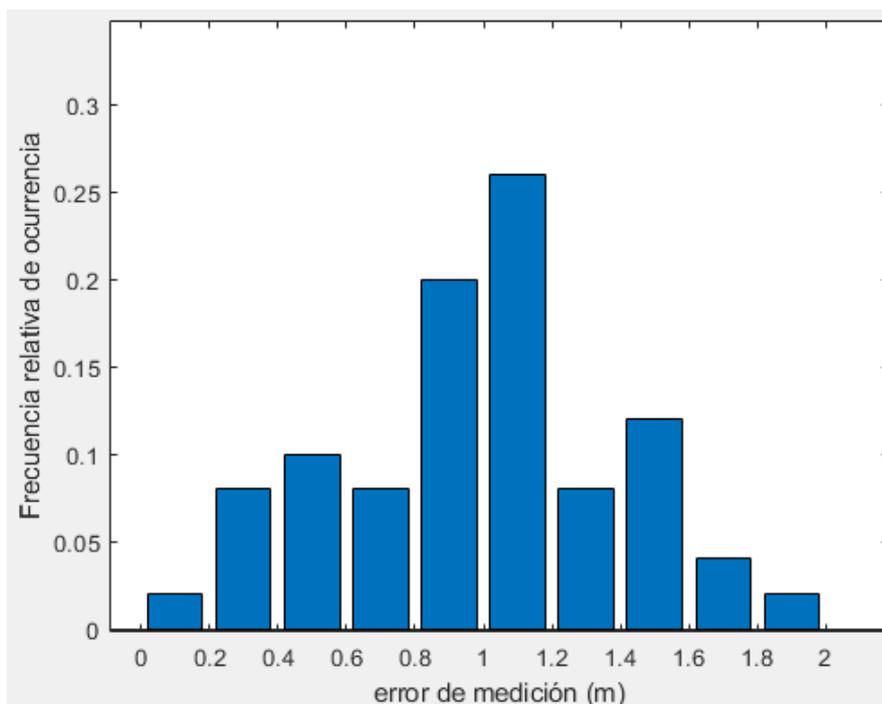


Figura 58: PDF para prueba P1.3.



Las CDF descritas en la Figura 59, muestran como la exactitud decrece de forma considerable; se aprecia como la probabilidad de obtener un error por debajo de un metro de distancia es de 48% y 52 %, respectivamente. Con respecto a la prueba P1.1 la exactitud disminuyo un 44%, esto representa un error bastante significativo, sin embargo, su media se sitúa por debajo de un metro del error de medición, no obstante, estos resultados denotan una exactitud baja para posicionamiento en interiores, por ello la prueba se debe replantear cambiando y ajustando parámetros para mejorar su exactitud.

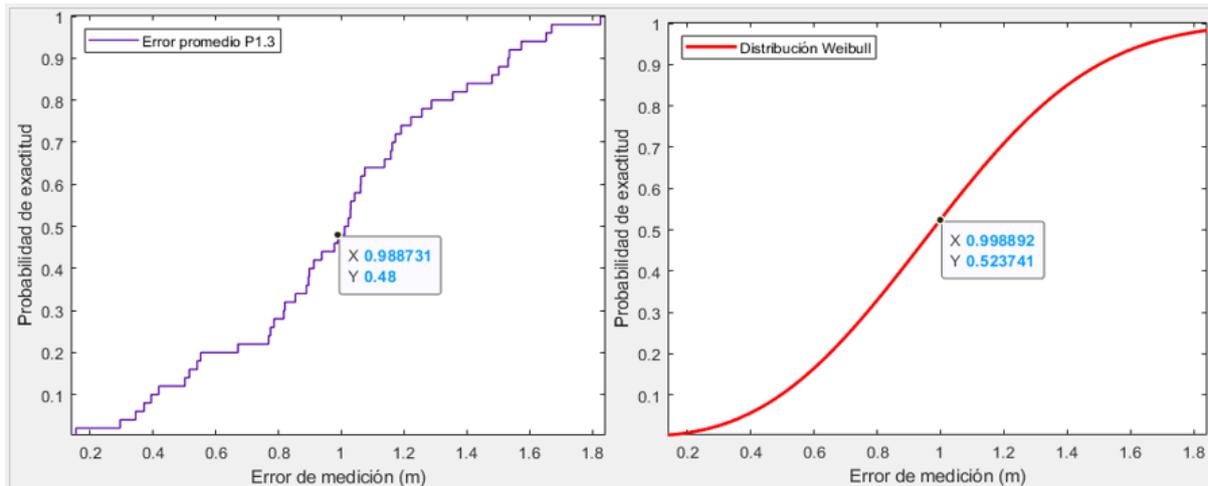


Figura 59: Probabilidades de error para análisis de exactitud prueba P1.3.

3.4.2 Pruebas sobre escenario ESC2

El escenario de la Figura 60 se sitúa en un patio de una casa familiar, sus dimensiones son más amplias y es más susceptible a efectos de desvanecimiento en la señal, sobre este escenario se realizan las pruebas propuestas anteriormente.



Figura 60: Escenario ESC2.



Para este escenario se seleccionaron 84 puntos distribuidos como se muestra en la Figura 61, cada punto está separado una distancia de 0,58 m y los nodos referencia se encuentran en las coordenadas (0 , 0) y (0 , 7,54).

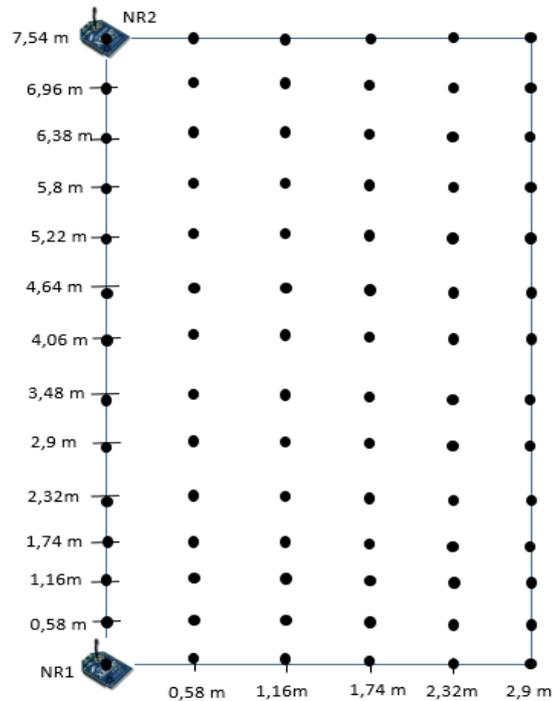


Figura 61: Distribución de puntos para ESC2.

- Prueba P2.1 – EC2

La prueba inicial tiene las mismas características de la prueba P1.1, esta servirá como la base del experimento sobre el escenario ESC2, los resultados se ilustran en el plano cartesiano de la Figura 62.

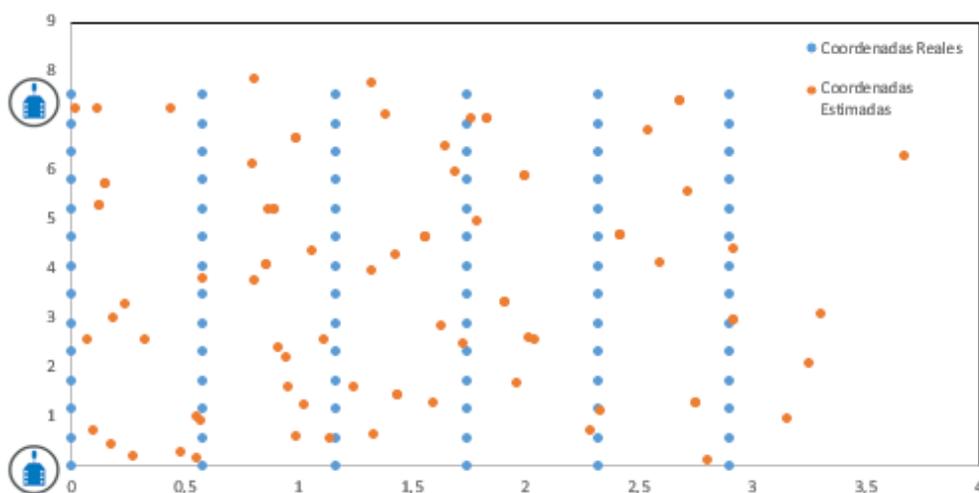


Figura 62: Resultados de la prueba P2.1 en escenario ESC2.

El error promedio para esta prueba fue de 0,55 m y la desviación estándar corresponde a 0,299 m, indicando que la dispersión del error es muy baja con respecto a la media. Este resultado en comparación al obtenido en la prueba P1.1 es



muy similar, sin importar que los escenarios tienen dimensiones diferentes, se puede identificar que el sistema funciona de manera adecuada en escenarios cerrados. El punto con la mayor exactitud es la coordenada (1,16 , 0,58) con un error promedio de 28,6 mm y el punto con el error más amplio se sitúa sobre la coordenada (2,9 , 7,54) con un error equivalente a 1,468 m. Para observar el comportamiento del error entre las coordenadas estimadas y las coordenadas reales, se emplea el mapa de calor de la Figura 63, donde se exhibe el error de medición representado mediante colores.

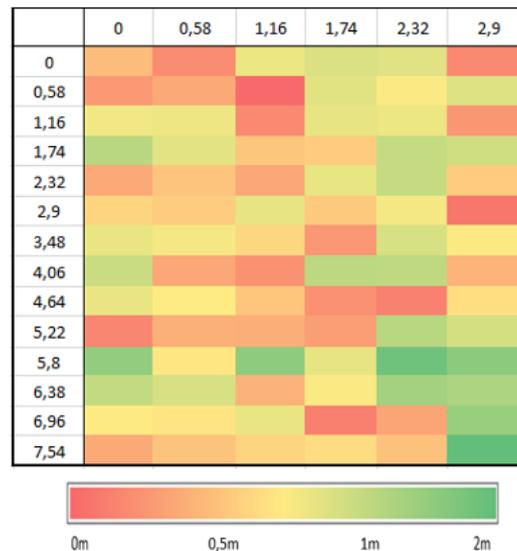


Figura 63: Mapa de calor para prueba P2.1 en escenario ESC2.

En este mapa de calor se pueden identificar muchas celdas que tienen tonos entre rojo y naranja, esto quiere decir que la mayoría de los errores se sitúan en el rango de 0 y 0,6 m; para analizar de forma más clara los resultados obtenidos se conforma la PDF que analiza la frecuencia de ocurrencia del error obtenido, esta se presenta en la Figura 64, donde se observa una gran ocurrencia de datos en el intervalo entre 0,2 y 0,8 m, con una ocurrencia aproximada de 70 datos y una probabilidad de 0,83, también se pueden identificar errores por encima de un metro, estos presentan una ocurrencia de 6 datos y una probabilidad de 0,07. Las probabilidades y la frecuencia de ocurrencia de los intervalos de medición para la prueba P2.1 se observan en la Tabla 23.

Tabla 23: Resultados PDF para prueba P2.1.

Intervalos	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1	1-1,2	1,2-1,4	1,4-1,6
Frecuencia de ocurrencia	11	20	17	22	8	4	1	1
Probabilidad	0,12	0,24	0,21	0,26	0,1	0,05	0,01	0,01

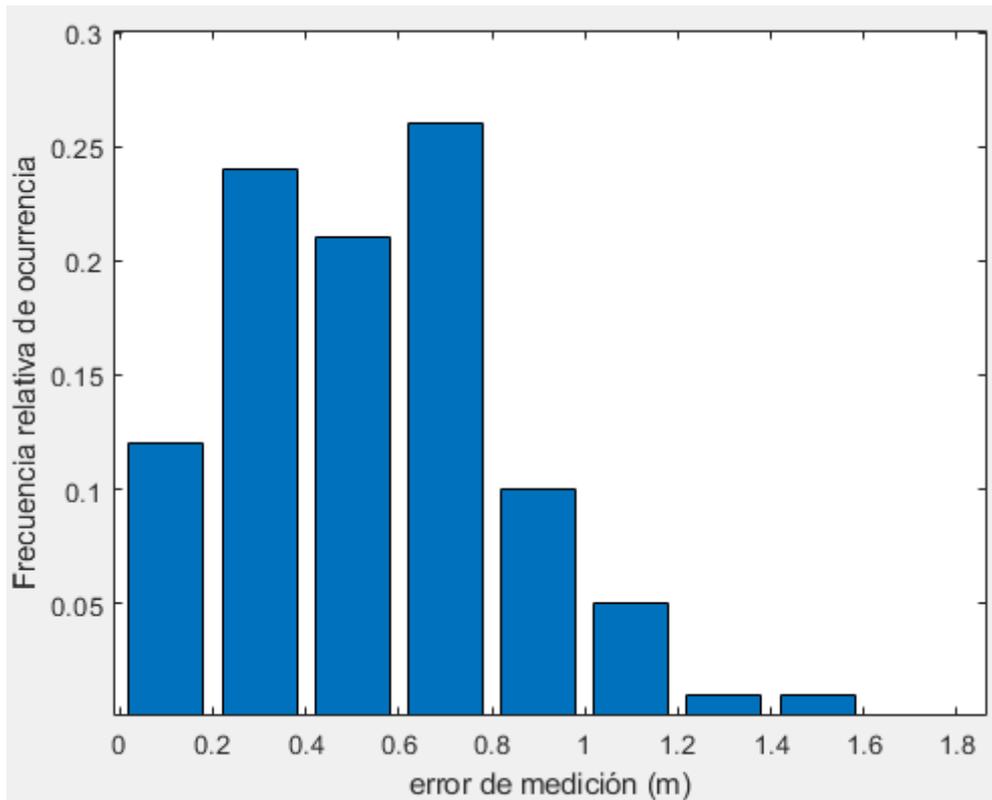


Figura 64: PDF para prueba P2.1.

Para analizar la exactitud del sistema en el escenario ESC2 se debe realizar la CDF para el error promedio obtenido en la prueba P2.1, esta se expone en la Figura 65, donde se nota un comportamiento discreto, además, la CDF tiene una forma semejante a una distribución de probabilidad, para comprobar cual distribución se ajusta mejor a los resultados obtenidos, se realiza nuevamente el test de chi-cuadrado.

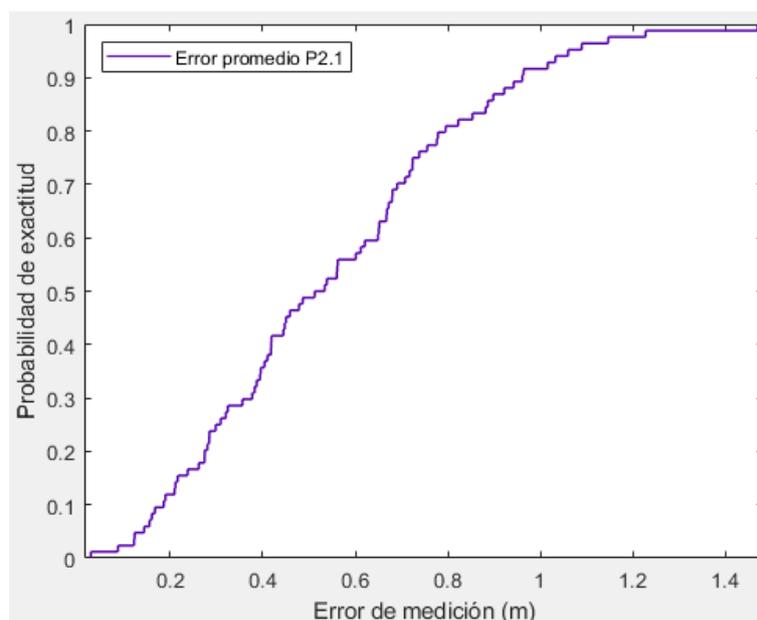


Figura 65: CDF para la prueba P2.1



Para realizar el test de chi-cuadrado se emplean las tres distribuciones mencionadas en la prueba P1.1. En la Figura 66 se corrobora como dos distribuciones son aceptadas por el test, la distribución normal presenta una probabilidad de 0,1445 y la distribución Weibull obtiene mayor probabilidad de ajuste con un 0,4784, mientras que la distribución lognormal es rechazada porque tiene una probabilidad de ajuste equivalente a 0,0447. Por esto se utiliza la distribución Weibull para realizar el análisis de exactitud sobre este escenario.

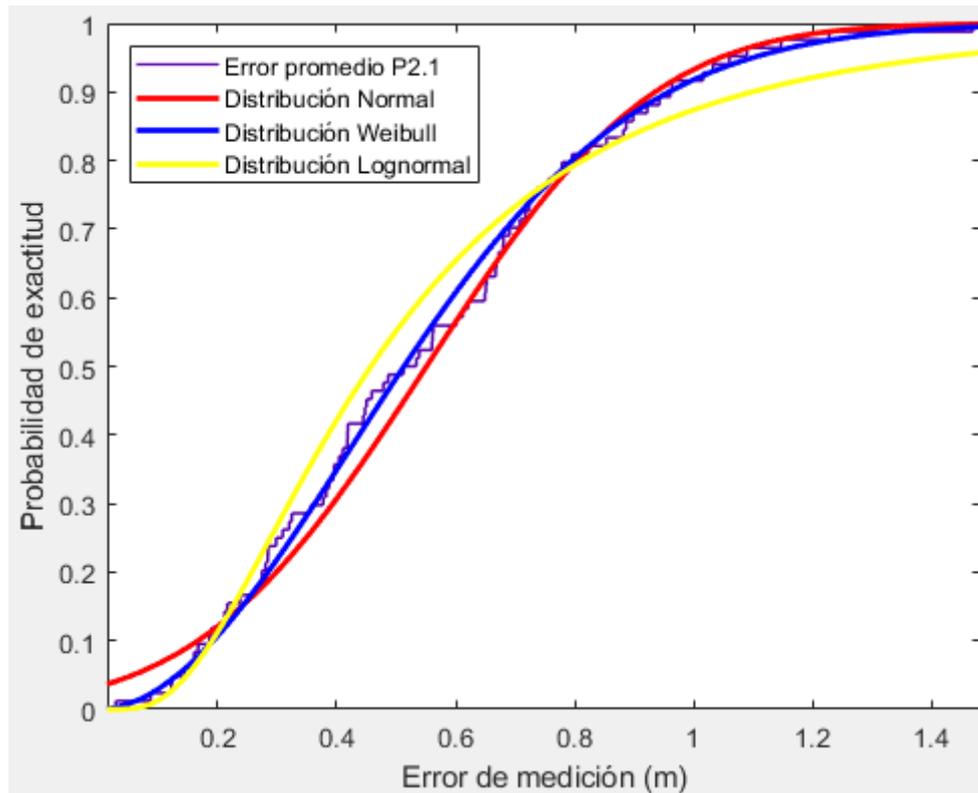


Figura 66: Test chi-cuadrado para P2.1.

Por medio de la CDF discreta y continúa presentadas en la Figura 67, se analiza que la exactitud del sistema es alta ya que, para lograr un error de medición menor a un metro, la probabilidad en ambos casos es superior al 90%. Este resultado es adecuado para el posicionamiento en interiores y denota un comportamiento aproximadamente ideal dentro del escenario, a pesar del tamaño de este entorno, la exactitud se conserva con respecto al ESC1 y a la prueba P1.1.

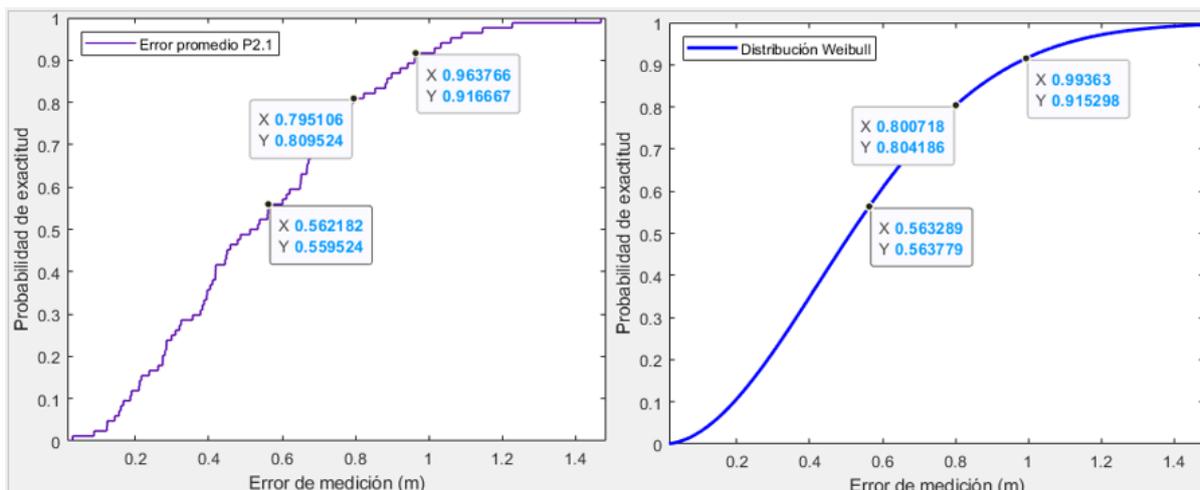


Figura 67: Probabilidades de error para análisis de exactitud prueba P2.1.

- **Prueba P2.2 – ESC2**

Esta prueba tiene como propósito analizar la influencia de la presencia humana dentro del escenario ESC2, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 68, donde se denota una mayor dispersión de los puntos estimados que en la prueba P2.1.

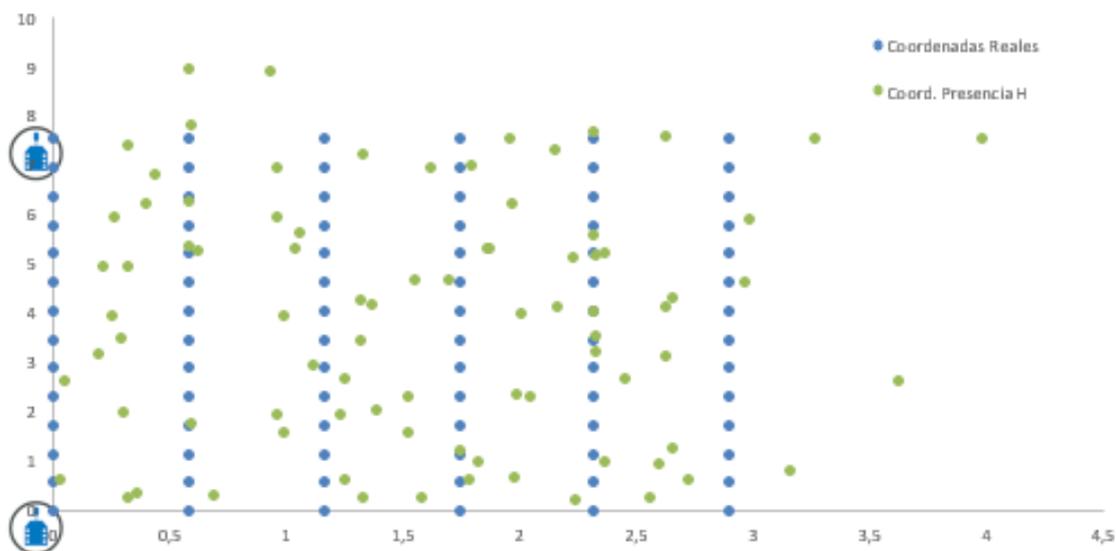


Figura 68: Resultados de la prueba P2.2 en escenario ESC2.

Para esta prueba se obtuvo un error promedio de 0,723 m y una desviación estándar de 0,374 m, ratificando que la dispersión es mayor en comparación con la prueba anterior, este resultado reafirma lo descrito en la prueba P1.2, donde se indica como el cuerpo humano altera y perturba el funcionamiento del sistema en entornos cerrados, sin embargo, estas variaciones pueden ser corregidas mediante ajustes en los parámetros y calibraciones del sistema. La coordenada que presenta la mayor exactitud es (0,58 , 1,74) con un error de 0,0515 m y el error más grande se establece en la coordenada (2,9 , 5,8) con un error igual a 1,923 m. En el mapa de calor de la



Figura 69, se denota el comportamiento del error para cada una de las coordenadas muestreadas, se evidencia cómo predominan los tonos amarillo y naranja presentando un error entre 0,5 y 1 m.

Con el error obtenido para cada punto, es posible conformar la PDF, ilustrada en la Figura 70, en esta se observa una mayor ocurrencia de datos distribuida entre los intervalos de 0,2 a 1,2 m, notando que la mayoría de los datos se concentran en el intervalo entre 0,8 y 1, este intervalo representa una ocurrencia de 19 datos con una probabilidad de 0,21. Los intervalos que superan un 1 m de distancia tienen la misma probabilidad y frecuencia que el intervalo con mayor agrupación de datos. Las frecuencias de ocurrencia y su respectiva probabilidad se presentan en la Tabla 24.



Figura 69: Mapa de calor para prueba P2.2 en escenario ESC2.

Tabla 24: Resultados PDF para prueba P2.2.

Intervalo	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1	1-1,2	1,2-1,4	1,4-1,6
Frecuencia de ocurrencia	5	13	14	14	19	13	3	3
Probabilidad	0,07	0,15	0,17	0,17	0,21	0,15	0,03	0,03

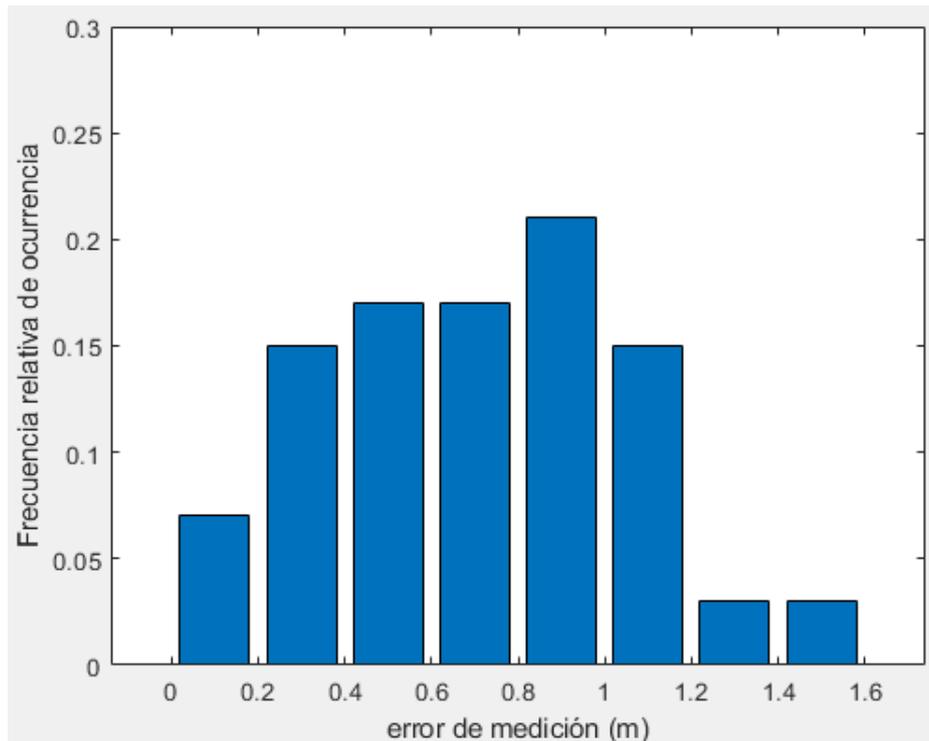


Figura 70: PDF para prueba P2.1.

Para evaluar la exactitud que tiene el sistema bajo la presencia humana se conforma la CDF para los resultados obtenidos, como se estableció en la prueba P2.1, se emplea la distribución Weibull para el análisis de los datos. De la Figura 71, se deduce que la probabilidad de conseguir un error menor a un metro de distancia supera el 78%, en comparación con la prueba P2.1 la exactitud del sistema disminuye un 15%, sin embargo, esta alteración es semejante a la obtenida en la prueba P1.2 donde se tiene un escenario más pequeño con las mismas condiciones. Esto indica que el sistema tiene un funcionamiento homogéneo en ambos escenarios.

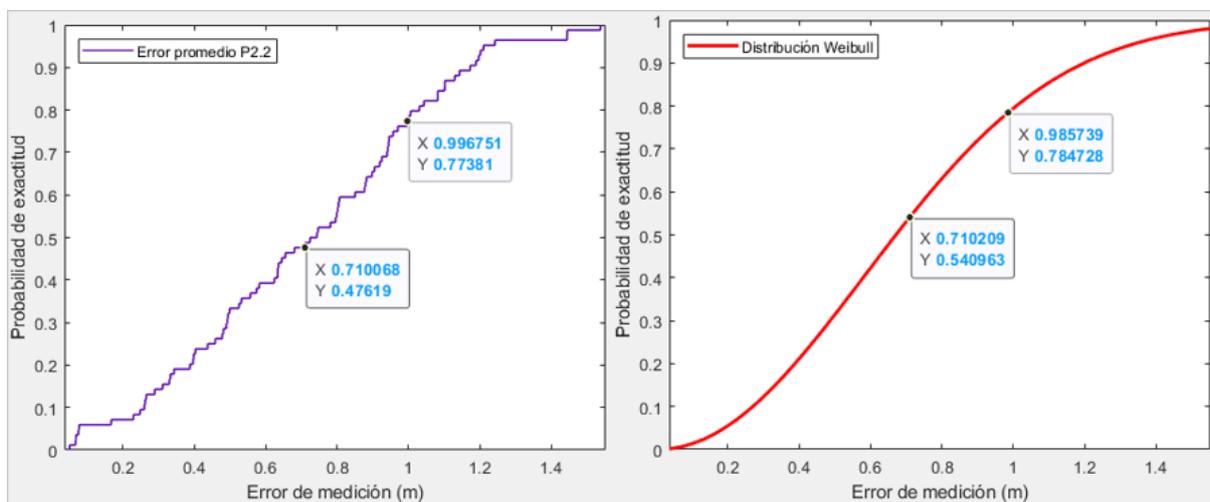


Figura 71: Probabilidades de error para análisis de exactitud prueba P2.2.



• **Prueba P2.3 – ESC2**

Esta prueba es similar a la realizada en la prueba P1.3, en la Figura 72 se perciben puntos estimados muy separados de los puntos reales, esto indica un error considerable en la estimación de la coordenada.

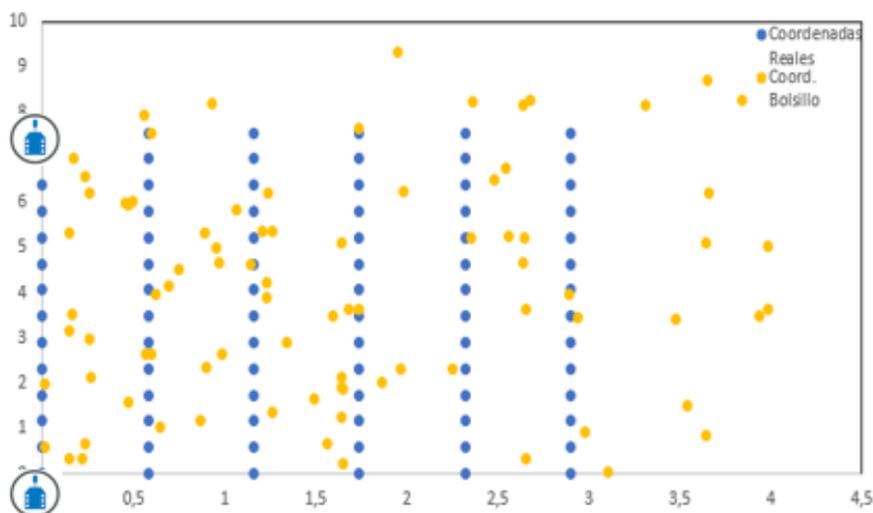


Figura 72: Resultados de la prueba P2.3 en escenario ESC2.

El error promedio alcanzado para esta prueba es de 1,027 m y una desviación estándar de 0,522 m, que denota un aumento en la dispersión en el sistema. El error obtenido es muy amplio y advierte una alteración significativa del funcionamiento del sistema. El punto con la mayor exactitud es la coordenada (2,9 , 3,48) con un error de 0,084 m y el punto con menor exactitud es (2,9 , 1,16) con un error igual a 2,329 m. En la Figura 73 se estudia cómo se comporta el error de medición en el plano cartesiano, donde se identifica una gran cantidad de celdas con tonos verdes, justificando la presencia de errores por encima de un metro de distancia.



Figura 73: Mapa de calor para prueba P2.3 en escenario ESC2.



Para analizar con más detalle el error obtenido en la prueba anterior se conforma la PDF. En la Figura 74 se muestra cómo se distribuye el error logrado en la prueba P2.3, en esta se observa que el intervalo entre 0,6 y 0,9 m contiene la mayor ocurrencia de los resultados, la ocurrencia para este intervalo es de 22 datos con una probabilidad igual a 0,26, además se puede establecer que hay una gran afluencia de datos por encima de 0,9 m de distancia con una ocurrencia cercana a 44 datos y una probabilidad de 0,53. Las frecuencias de ocurrencia y las probabilidades de error se presentan en la Tabla 25.

Tabla 25: Resultados PDF para prueba P2.3.

Intervalo	0-0,3	0,3-0,6	0,6-0,9	0,9-1,2	1,2-1,5	1,5-1,8	1,8-2,1	2,1-2,4
Frecuencia de ocurrencia	4	14	22	17	11	8	5	3
Probabilidad	0,04	0,17	0,26	0,20	0,13	0,1	0,06	0,03

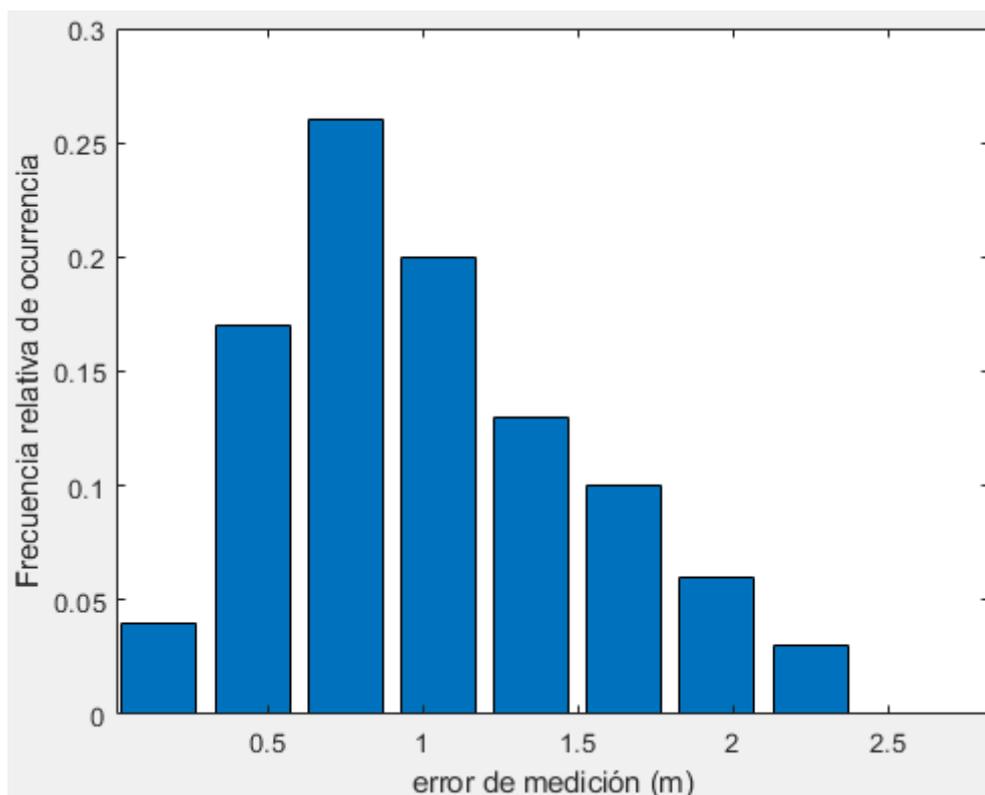


Figura 74: PDF para prueba P2.3.

Finalmente se conforma la CDF con el error promedio obtenido, para el análisis de la exactitud se emplea nuevamente la distribución Weibull, la Figura 75 presenta la probabilidad de lograr un error menor a un metro de distancia, en ambos casos la probabilidad es igual a 51%, en relación con la prueba P2.1 la exactitud decrece un 40% y con respecto a la prueba P1.3 donde se tienen las mismas características, este resultado se conserva, sin embargo, el error obtenido sugiere un declive importante



en la exactitud para el posicionamiento en interiores, esto a razón de que los dispositivos ZigBee son sensibles a la obstrucción crítica de las señal.

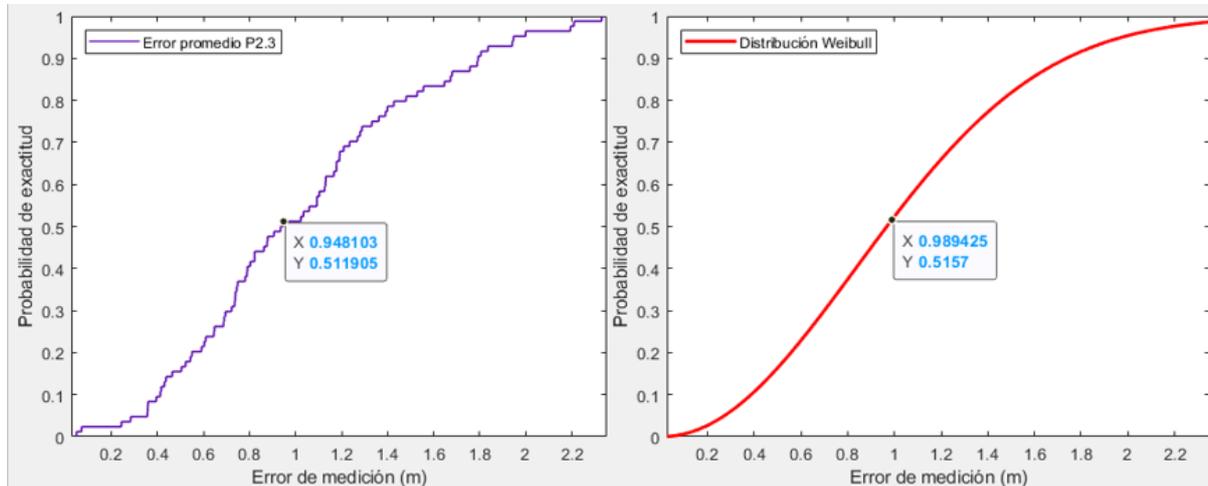


Figura 75: Probabilidades de error para análisis de exactitud prueba P2.3.

Los resultados totales de las pruebas sobre ambos escenarios se presentan en la Tabla 26, donde se visualiza cómo el sistema tiene un funcionamiento uniforme en ambos entornos. Los mejores resultados se obtuvieron cuando los escenarios presentaban condiciones ideales, es decir, ausencia de elementos que afecten la señal entre los dispositivos, la exactitud lograda en el error de medición en ambos escenarios sobrepasa el 90%, confirmando una estimación adecuada de la posición por medio del sistema.

Las pruebas que involucraban la presencia humana presentaron diferencias muy leves, sin importar las dimensiones de los escenarios, el sistema estima la posición de forma homogénea. El error promedio alcanzado para las pruebas es similar, esto se comprueba en el nivel de exactitud obtenido; un aspecto importante para resaltar es que la presencia humana altera la señal de los dispositivos, disminuyendo la exactitud en un 15% con respecto a las pruebas con condiciones ideales, no obstante, esta alteración no representa una perturbación significativa dentro del funcionamiento del sistema.

En las pruebas realizadas donde el usuario porta el dispositivo en el bolsillo, se evidenció una variación importante del sistema, esto se ocasiona en gran manera por la obstrucción en la señal de los dispositivos, ya que, en la calibración del sistema no se tiene en cuenta este factor, pues se parte de condiciones en línea de vista. Esto se refleja en los resultados donde se presenta el margen más amplio de error, sin embargo, como se mencionó, el sistema reacciona de forma coherente para estas pruebas, pues la alteración en los escenarios es semejante. No obstante, las pruebas realizadas bajo estas condiciones no exponen resultados apropiados para el posicionamiento en interiores, por esto, se deben replantear los parámetros que se definieron para el modelo de propagación, incluyendo la presencia humana y sus efectos dentro del escenario.



Tabla 26: Resultados sobre escenarios cerrados.

Entorno	Escenario 1			Escenario 2		
	Inicial	Con presencia Humana	De Bolsillo	Inicial	Con presencia Humana	De Bolsillo
Error promedio (m)	0,507	0,686	0,990	0,550	0,714	1,027
Proba. <1m Real	96%	82%	48%	91%	76%	51%
Proba. <1m Weibull	92%	78%	52%	91%	78%	51%

- **Ajuste y corrección de pruebas en bolsillo**

Como se mencionó, las pruebas que determinan la exactitud del sistema con obstrucción de la señal presentan los resultados más deficientes, por esto se propone una reconfiguración de los parámetros n y A donde se realizan las mismas pruebas que en la sección 3.3.5, con la diferencia que, en el momento de tomar las muestras, el nodo destino se encuentra dentro del pantalón del usuario final. Se emplean los escenarios descritos en la sección nombrada, para el parámetro A se toman 16 puntos de muestreo desde cada esquina del escenario, dando como resultado 800 datos medidos. Para el exponente de propagación denominado n se realiza el mismo procedimiento solo que, para este caso, se realizan 30 medidas sobre cada punto, dando un total de 4800 datos medidos.

Al realizar esta reconfiguración se determina que los valores cambian, para el parámetro A su valor se altera acercándose a -31 dBm, mientras que para el exponente de propagación n el valor decae a 2,3. Con estos nuevos valores es posible repetir las pruebas con la obstrucción de la señal y de esa forma evaluar si los ajustes tienen validez.

Para la prueba sobre el escenario ESC1 se mantienen las mismas características y puntos de muestreo, los resultados se ilustran en la Figura 76, donde se puede identificar una mejora en la estimación de los puntos, ya que la dispersión es menor comparada a la prueba sin ajuste, esto se evidencia en la desviación estándar obtenida ya que presenta un valor de 0,266 m, el error promedio con ajuste se sitúa en 0,604 m denotando una mejoría de casi 0,4 m, un valor muy cercano al error obtenido en la prueba P1.1.

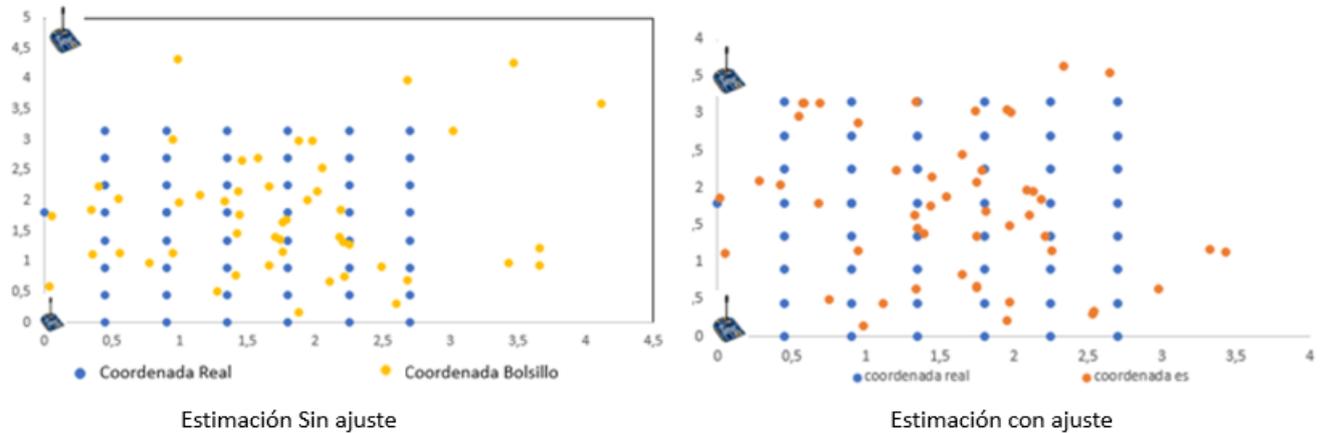


Figura 76: Comparación entre resultados prueba P1.3.

Al conformar la PDF para los resultados que incluye el ajuste ilustrado en la Figura 77, es claro que la concentración de datos se alberga en el intervalo 0,2-0,4 m con una ocurrencia de 15 datos y una probabilidad de 0,3, en comparación a la frecuencia obtenida sin ajuste, se presenta una mejora significativa, puesto el error máximo se sitúa en el intervalo 1-1,2 m con una probabilidad de 0,06, mientras que en la prueba P1.3, el error máximo sobrepasa el intervalo de 2 m.

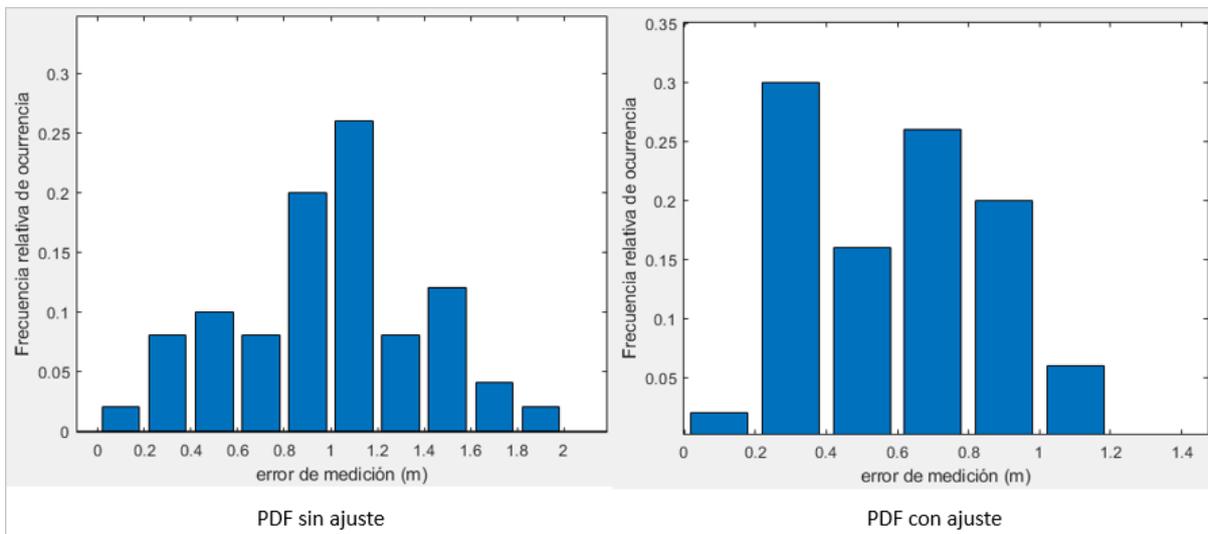


Figura 77: Comparación entre PDF prueba P1.3.

Con respecto a la exactitud del sistema mediante el ajuste, se construye la CDF que se aprecia en la Figura 78, esta prueba determina que la probabilidad de obtener un error de medición menor a 1 m es mayor al 90%, en comparación a la prueba sin ajuste donde su exactitud es del 50%, hay un incremento considerable cercano al 40%. Esto confirma que el ajuste realizado para el escenario ESC1 es válido y expone una estimación adecuada para el posicionamiento en interiores.

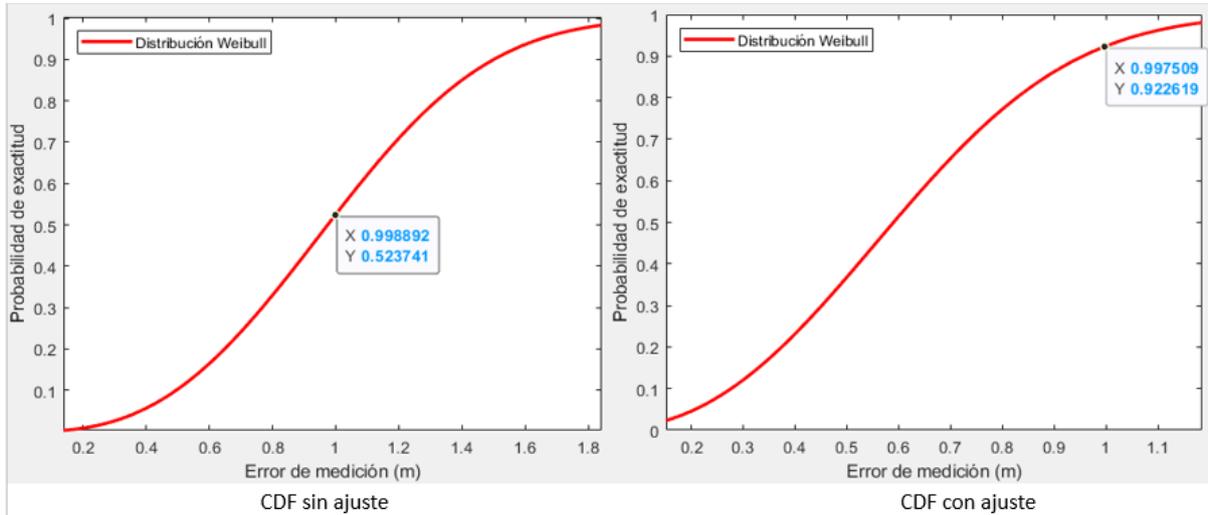


Figura 78: Comparación CDF prueba P1.3.

Para el escenario ESC2 se reitera la prueba P2.3, manteniendo las mismas características y el número de puntos muestreados, para garantizar homogeneidad del escenario y sistema. Los resultados de la prueba aplicando el ajuste se presentan en la Figura 79, donde al igual que en la prueba anterior, se observa una reducción considerable de la dispersión de los puntos, sin embargo, se muestran puntos desfasados, pero en menor cantidad que en la prueba P2.3. El error promedio para esta prueba es de 0,627 m y su desviación estándar de 0,398 m, reafirmando que la dispersión disminuye con respecto a la prueba sin ajuste.

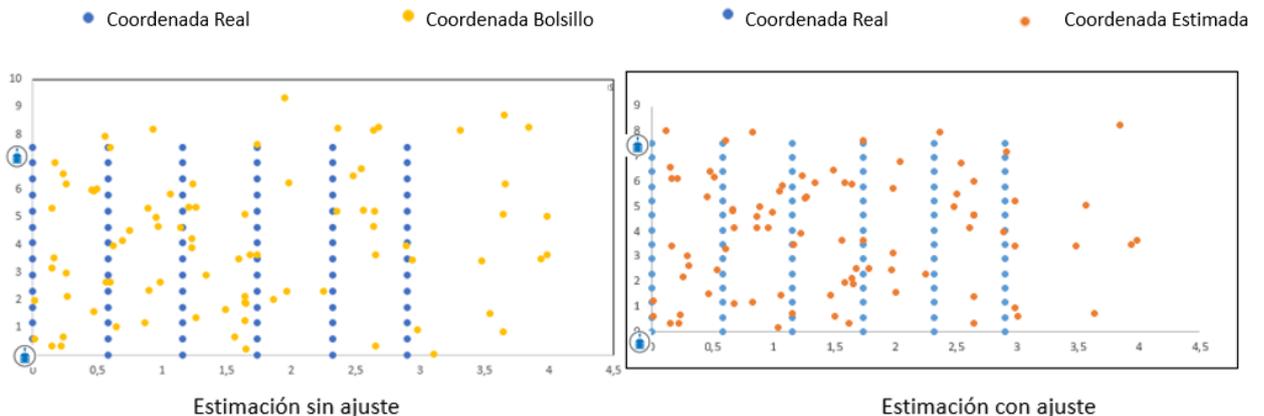


Figura 79: Comparación entre resultados prueba P2.3.

El comportamiento del error se analiza mediante la PDF expuesta en la Figura 80, en esta se presenta una frecuencia de ocurrencia considerable en el intervalo entre 0,4 y 0,8 m, con una probabilidad de 0,54 y una ocurrencia de 44 datos, esto evidencia una mejora considerable con respecto a la PDF sin ajuste, ya que el porcentaje de error que supera el metro de distancia es mucho mayor al obtenido en la prueba con ajuste.

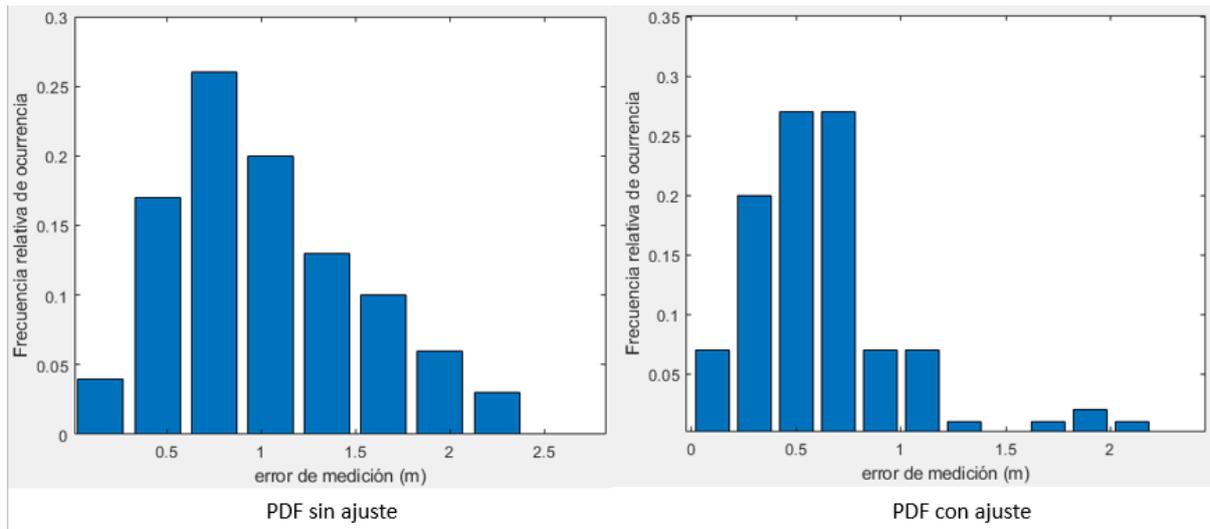


Figura 80: Comparación PDF prueba P2.3.

Los ajustes realizados ayudan a mitigar la obstrucción crítica de la señal sobre los escenarios, en la Figura 81, para el escenario ESC2, la probabilidad de obtener un error de medición menor a 1 m es superior al 80%, muy por encima del valor obtenido en la prueba sin ajuste, el incremento en la exactitud es del 30% un valor cercano al alcanzado en la prueba anterior, esto corrobora que la obstrucción crítica de la señal si afecta en gran medida a la tecnología ZigBee y al sistema desarrollado, sin embargo, la reconfiguración de los parámetros es fundamental para garantizar que el sistema funcione de manera adecuada.

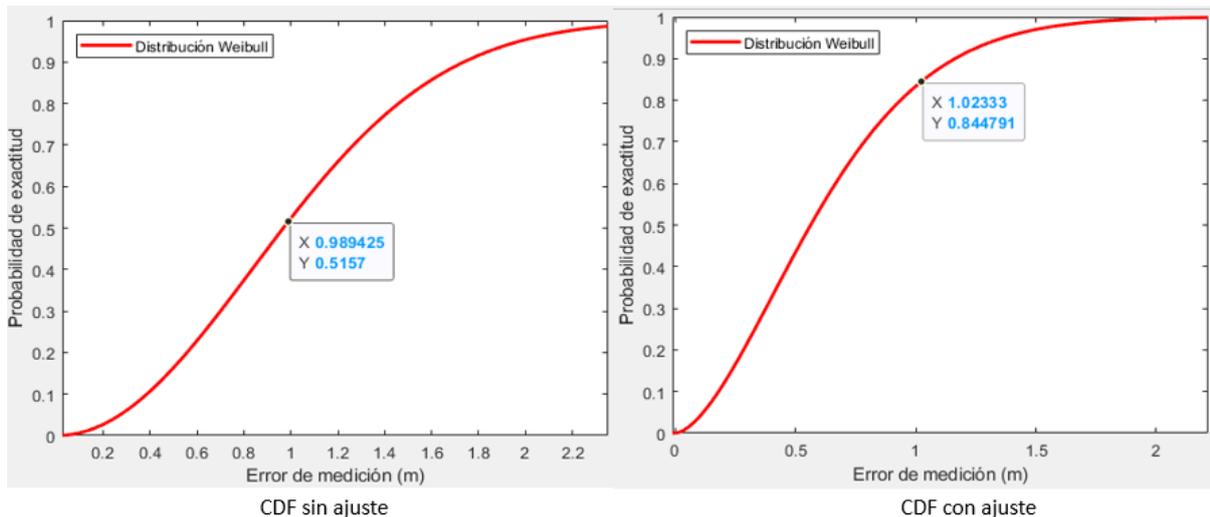


Figura 81: Comparación CDF prueba P2.3.



3.4.3 Pruebas sobre escenario semiabierto

El sistema está diseñado e implementado para escenarios cerrados, sin embargo, analizar su funcionamiento en un escenario exterior es de suma importancia, ya que algunas aplicaciones se encuentran emplazadas sobre superficies de gran tamaño, como centros comerciales, parqueaderos, museos, hospitales, entre otros. Estos escenarios en ocasiones tienen espacios al aire libre, por ello se debe ejecutar el sistema en este contexto, para analizar el comportamiento de su exactitud, para ello se propone la prueba P3.1 donde el sistema se despliega en un escenario semiabierto, representado por el antejardín de una casa familiar como se indica en la Figura 82, este escenario tiene un tamaño de 7,2 x 3 m, se encuentra rodeado por una reja exterior y está cubierto por un techo de zinc.



Figura 82: Escenario ESC3.

Sobre este escenario se proponen 30 puntos de muestreo distribuidos como se muestra en la Figura 83, donde los nodos referencia se sitúan sobre las coordenadas (0 , 3) y (7,2 , 3).

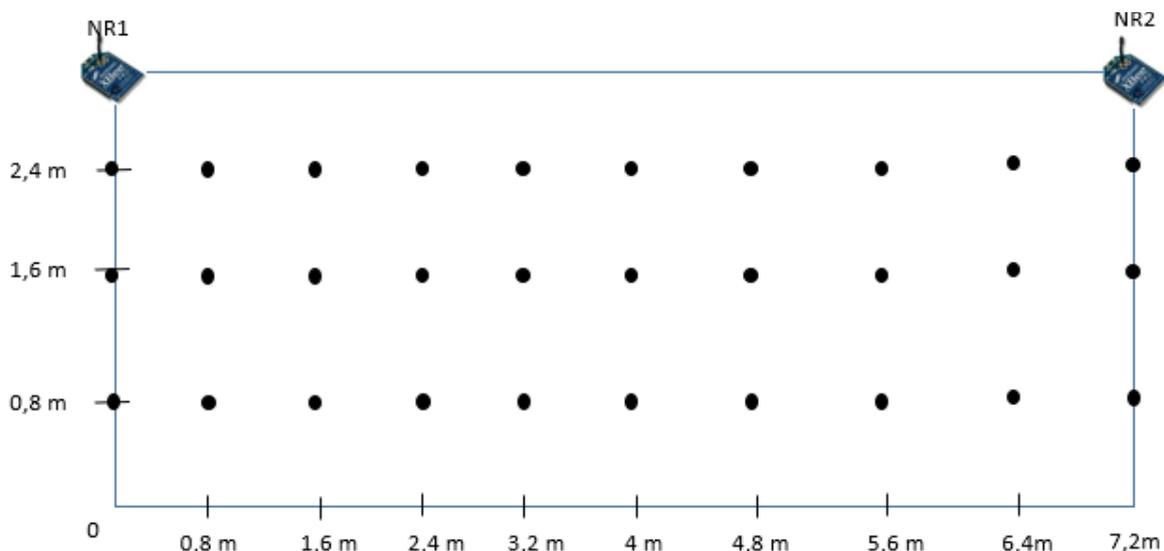


Figura 83: Distribución de puntos sobre escenario ESC3.

Para el desarrollo de esta prueba se proponen condiciones ideales, tratando de eliminar la mayor cantidad de pérdidas y procurando mitigar la mayoría de los fenómenos físicos que perturben el funcionamiento del sistema, esta prueba se realiza sin presencia humana y obstáculos que interfieran la señal. Los resultados se ilustran en la Figura 84.

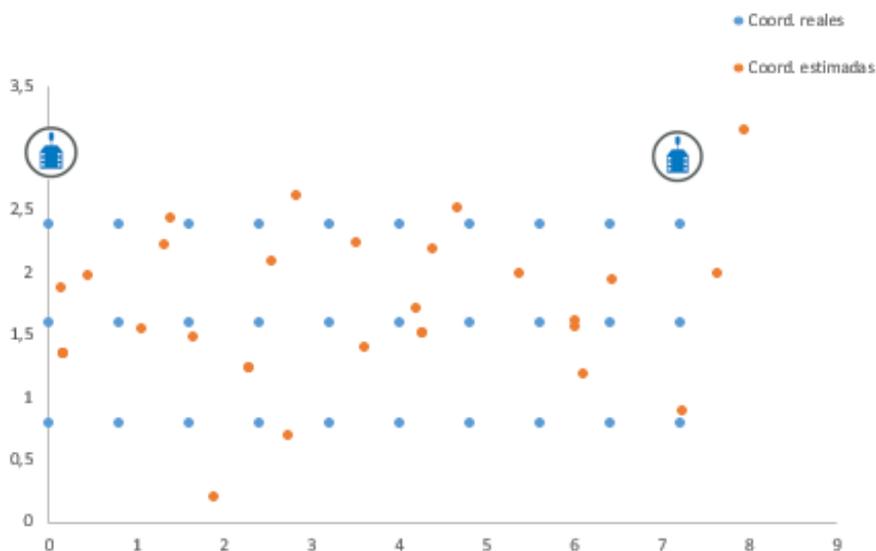


Figura 84: Resultados de la prueba P3.1 en escenario semiabierto.

En la prueba anterior se obtiene un error promedio de 0,656 m y una desviación estándar de 0,296 m, que indica una dispersión baja con respecto a la media, este resultado es similar al obtenido en pruebas anteriores, teniendo en cuenta que el sistema se sitúa sobre un escenario semiabierto, el punto con mayor exactitud es la coordenada (1,6 , 1,6) con un error de 0,112 m, sin embargo, el error de exactitud más amplio se ubica en las coordenadas (7,2 , 0,8) con 1,27 m de desfase, mediante



el mapa de calor de la Figura 85 se nota como se distribuye el error de medición sobre el escenario muestreado.

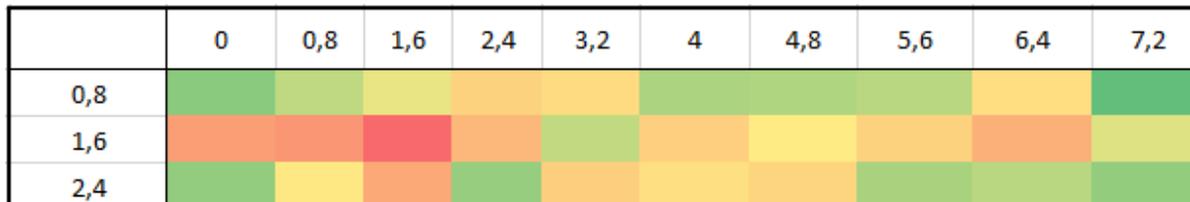


Figura 85: Mapa de calor escenario semiabierto.

En el mapa de calor es posible notar como la gran mayoría de puntos presentan el color indicativo para un error de 0,5 y 0,6 m, además, se observa cómo hay una cantidad mínima de puntos con un error por encima del metro de distancia. La PDF para esta prueba se muestra en la Figura 86, donde se identifican los intervalos de error, en esta se aprecia como el intervalo de 0,3 a 0,6 tiene la ocurrencia más alta, con una probabilidad de 0,44 y una frecuencia de 13 datos, los intervalos por encima de 0,9 m presentan una ocurrencia de 8 datos y una probabilidad de 0,26, las respectivas frecuencias de ocurrencia y sus probabilidades se indican en la Tabla 27.

Tabla 27: Resultados PDF para prueba P3.1.

Intervalos	0-0,3	0,3-0,6	0,6-0,9	0,9-1,2	1,2-1,5
Frecuencia de ocurrencia	3	13	6	7	1
Probabilidad	0,1	0,44	0,2	0,23	0,03

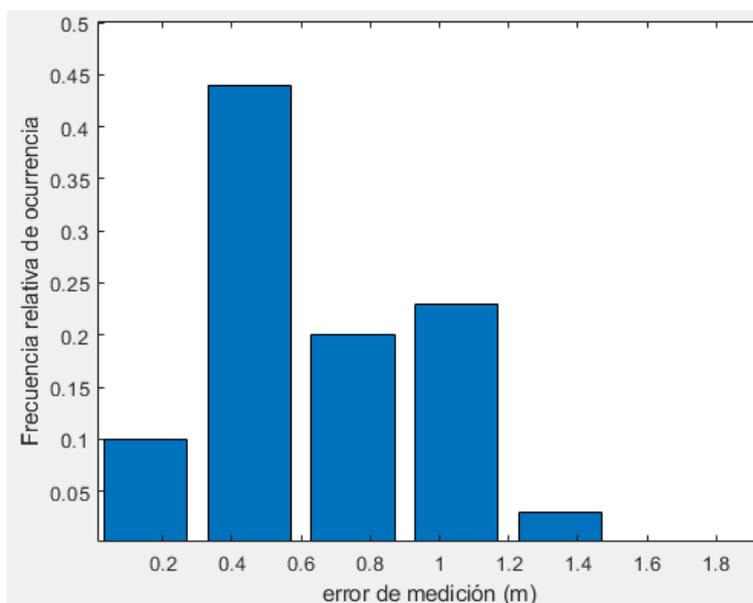


Figura 86: PDF para prueba P3.1.



Para analizar la exactitud de la prueba se construye la CDF del error promedio, como se estableció en las pruebas anteriores se emplea la distribución Weibull para determinar la exactitud del sistema en un escenario semiabierto. En la Figura 87, se visualiza la probabilidad de obtener un error de exactitud menor a 1 m, en ambos casos supera el 83% también se puede establecer que la probabilidad de alcanzar un error por debajo de la media es superior al 51%. La exactitud obtenida tiene una diferencia menor del 10% con respecto a la lograda en los escenarios cerrados, esto denota un funcionamiento adecuado del sistema sobre un escenario alterno, confirmando que el sistema sobrepasa los requisitos de exactitud para el posicionamiento en interiores.

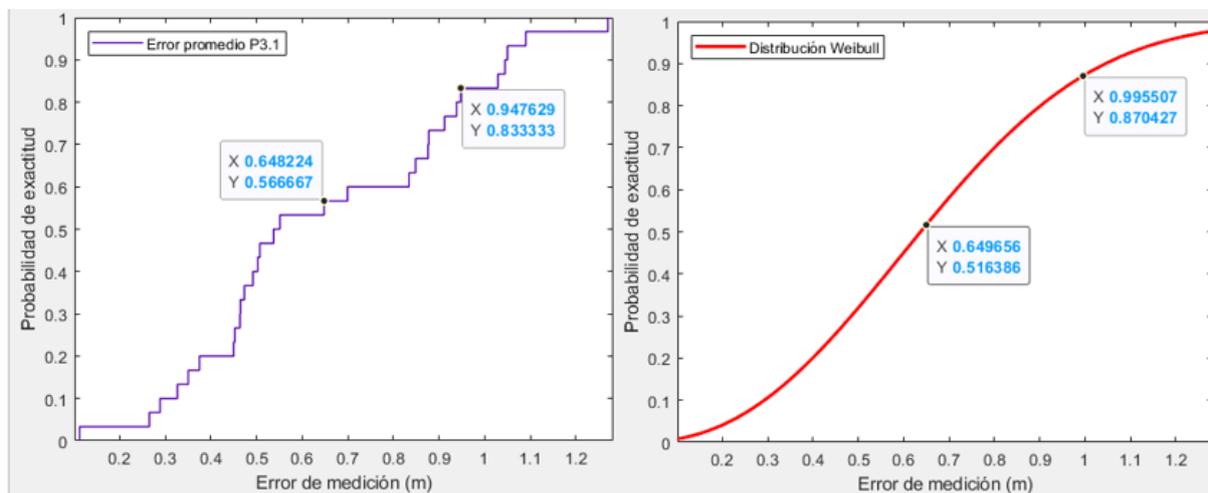


Figura 87: Probabilidades de error para análisis de exactitud prueba P3.1.



4. CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones producto del desarrollo del actual trabajo de grado, además de plantear posibles trabajos futuros que den continuidad al estudio del posicionamiento en interiores dentro de la FIET.

4.1 Conclusiones

- Para diseñar e implementar un sistema de posicionamiento en interiores es importante determinar la métrica y técnica que se adapten a los dispositivos de la tecnología y a los requisitos del sistema. La selección de la técnica se hizo con base en un estudio realizado sobre las técnicas de posicionamiento empleando ZigBee, la angulación se destacó sobre las demás, ya que puede ser implementada sobre cualquier entorno, además, de basarse en el cálculo de distancia mediante ángulos, no requerir sincronización ni hardware adicional y requerir de poco procesamiento. En cuanto a la métrica de posicionamiento, RSSI se evidenció como la opción más factible puesto que se ajusta a la tecnología y a la técnica seleccionada, formando una combinación adecuada para estimar la posición de un usuario.
- Para la implementación del sistema de posicionamiento se tuvo en cuenta el costo de los dispositivos, para los nodos referencia y el nodo destino se emplearon un módulo XBee ZB S2C, una placa XBee Explorer USB y una batería portátil de 2500 mA, en promedio, el costo total de estos nodos fue de \$ 93.300. COP. Para el nodo procesamiento donde se incluye una tarjeta Arduino uno, el precio estimado es de \$ 112.300. COP. Comparando otras tecnologías y diferentes dispositivos, este costo es relativamente bajo y brinda resultados adecuados.
- Para llevar a cabo la implementación del sistema de posicionamiento fue necesario realizar pruebas de ajuste y calibración sobre el escenario con el propósito de mejorar la exactitud del sistema. Las calibraciones ejecutadas parten del modelo de propagación, donde se comprueba que los parámetros A y n tienen una influencia directa sobre los escenarios cerrados, mediante las pruebas se establece que los valores que generan mejores resultados son -28 dBm y 2,9 respectivamente. Las calibraciones adicionales como el número de muestras, el tipo de muestra, la altura de dispositivos, la orientación de antena y la ubicación de los nodos referencia, permitieron garantizar un funcionamiento uniforme dentro del entorno.
- La evaluación del sistema de posicionamiento se realizó con base en la exactitud del error promedio obtenido, en los resultados de las pruebas se demostró que, en la mayoría, se cumple con el requisito de ser menor o igual a 1 m, puesto el error promedio se sitúa entre 0,507 m y 1,027 m dependiendo el tipo de escenario. Las pruebas realizadas comprobaron que la exactitud es



directamente proporcional al tamaño del escenario, esto sucede porque diferentes factores afectan las señales de radiofrecuencia, como el multitrayecto, la reflexión y el desvanecimiento.

- Al realizar las pruebas sobre los escenarios donde se mantienen condiciones ideales, se determinó que la exactitud obtenida fue aceptable, ya que el error promedio se ubicó por debajo de 0,55 m y la probabilidad de obtener un error menor a 1 m se encuentra por encima del 90%.
- Las pruebas que analizaban el comportamiento de la presencia humana dentro de los escenarios, mostraron una leve afectación al desempeño del sistema, puesto que, el error promedio se distribuyó entre 0,686 y 0,714 m, estos resultados cumplen con el requisito de exactitud de posicionamiento ya que se encuentran por debajo de 1 m, sin embargo, al determinar la probabilidad de alcanzar un error menor a 1 m, está decayó aproximadamente un 14%, estas variaciones se deben a la interferencia, absorción y reflexión de la señal generadas por el cuerpo humano.
- Mediante las pruebas que evaluaban la obstrucción de la señal se identificó que el sistema presentó grandes afectaciones, ya que el error promedio superó el metro de distancia y la probabilidad de obtener un error por debajo de 1 m, fue muy baja, apenas sobrepasando el 50%. Estas alteraciones se ocasionan por el comportamiento caótico que tiene RSSI, sin embargo, para solucionar estos problemas, se realizó una reconfiguración de los parámetros A y n que permitieron ajustar el sistema a la obstrucción de la señal, dando como resultado una mejora cercana al 40% en la probabilidad de obtener un error menor a 1 m, y de 0,4 m en el error promedio.
- El sistema está diseñado e implementado para analizar la exactitud en un entorno interior, no obstante, algunas aplicaciones se emplazan en escenarios semiabiertos, por esto se ejecutó el sistema en un escenario alterno, arrojando resultados favorables ya que el error promedio obtenido fue de 0,656 m, un valor muy cercano al alcanzado en las pruebas en escenarios interiores, además la probabilidad de obtener un error por debajo de 1 m es superior al 80%, denotando que el sistema puede ser aplicado a estos entornos.
- A partir del desarrollo del presente trabajo de grado, se evidenció que la exactitud obtenida por el sistema sugiere que la tecnología ZigBee es una opción viable para realizar sistemas de posicionamiento en interiores de bajo costo, puesto que su grado de exactitud probada en diferentes entornos y con distintas alteraciones fue menor a 1 m.



4.2 Trabajos futuros

A continuación, se presentan posibles trabajos futuros que pueden mejorar el sistema realizado o plantear el desarrollo de nuevos dispositivos teniendo como referente este trabajo de grado.

- Implementar un sistema de posicionamiento en interiores usando la tecnología ZigBee en el que se pueda visualizar la información de posicionamiento de un objeto mediante una aplicación gráfica, en la que se pueda configurar las características del entorno.
- Encontrar un factor de ajuste que permita variar características del entorno de pruebas, como altura de los dispositivos ZigBee, dirección de antena o ubicación de los dispositivos, tamaño del escenario, obteniendo una exactitud menor o igual a 1 m.
- Definir un mecanismo que permita mejorar la calidad de los resultados para obtener una exactitud en la ubicación de uno o más objetos o personas en espacios interiores en el rango de los centímetros, usando la tecnología ZigBee junto a la técnica y métrica de posicionamiento propuesta para el desarrollo del presente trabajo de grado.
- Implementar un sistema de posicionamiento basado en ZigBee que permita la ubicación y seguimiento de un usuario en tiempo real.
- Construir un sistema de posicionamiento empleando la tecnología ZigBee que combine las técnicas de medición de distancia para obtener una exactitud menor a 1 m.
- Diseñar e implementar un tipo de filtro o método que permita mejorar la calidad de las señales RSSI para un sistema de posicionamiento en interiores empleando la tecnología ZigBee.



REFERENCIAS

- [1] K. Yu, I. Sharp and Y. Jay Guo, *Ground-Based Wireless Positioning*. CSIRO ICT Centre Australia, 2009.
- [2] J. A. Puertolas-Montañez, A. Mendoza-Rodriguez, y I. Sanz-Prieto, "Smart Indoor Positioning/Location and Navigation: A Lightweight Approach," *Int. J. Interact. Multimed. Artif.Intell.*, vol. 2, n.o 2, p. 43, 2013, doi: 10.9781/ijimai.2013.225.
- [3] Z. Chen zkchen, "A localization method for the Internet of Things," *J. Supercomput.*, vol. 63, n.o 3, pp. 657-674, mar. 2013.
- [4] Tao Tao, Tong Zhong-hua and Zhang Hui-yi, "Depth Analysis of ZigBee Protocol on Wireless Sensoractuator Network," *Energy Procedia*, pp. 13, 2011.
- [5] X. Li y M. Chen, "Research of the Wireless Localization Technology Based on ZigBee," *Second International Conference on Business Computing and Global Informatization*. Shanghai, China, oct. 2012, pp. 699-701. doi: 10.1109/BCGIN.2012.187.
- [6] S. Sadowski y P. Spachos, "RSSI-Based Indoor Localization with the Internet of Things IEEE," *Access*, vol. 6, pp. 30149-30161, 2018, doi: 10.1109.
- [7] R. Mautz, "Indoor positioning technologies," vol. 86. Zürich: Schweizerische Geodätische Kommission, 2012.
- [8] F. J. Ariza-López, E. Xavier, E. Chicaiza, y X. Buenaño, "Métodos de evaluación de la calidad posicional en Hispanoamérica: análisis de la situación," *rcarto*, n.º 94, pp. 65-88, abr. 2017.
- [9] S. Fernández Arcones, "Posicionamiento 2D5 en interiores mediante comunicaciones inalámbricas RF," bachelorThesis, Universidad de Alcalá. Escuela Politécnica Superior, Alcala, Madrid, 2012
- [10] Y. Alvarez and F.Heras, "ZigBee-based Sensor Network for Indoor Location and Tracking Applications," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 7, pp. 3208-3214, July 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7587622.
- [11] K. Yu, I. Sharp, y Y. J. Guo, "Ground-Based Wireless Positioning," Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2009. doi: 10.1002/9780470747988.
- [12] JS Lee, Su. YW and Shen. CC, "A comparative study of wireless protocols: Bluetooth UWB ZigBee and WiFi," *Proceedings of the 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp. 46-51, November 2007.
- [13] J. Werb and C. Lanzl, "Designing a Positioning System for Finding Things and People Indoors," *IEEE Spec.*, vol. 35, no. 9, Sept. 98, pp. 71-78.
- [14] M. Pallas and G. Jourdain, "Active High Resolution Time Delay Estimation for Large BT Signals," *IEEE Trans. SP*, vol. 39, no. 4, Apr. 1991, pp. 781-88.
- [15] "Rfid: qué es y cómo funciona,"(2017, Oct 12),[Online].Available: <https://www.universidadviu.com/rfid-que-es/>.
- [16] F. Zafari, A. Gkelias and K. K. Leung, "A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2568-2599, thirdquarter 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2911558.
- [17] A. Alexandrov and V. Monov, "Method for Indoor Localization of Mobile Devices Based on AoA and Kalman Filtering," *12th Annual Meeting of the Bulgarian Section of SIAM*, pp. 1-12, 2017.



- [18] S. Joana, J.-G. Park, y W. Kim, "Adaptive Filtering for Indoor Localization using RSSI and LQI Measurement," en *Adaptive Filtering Applications*, L. Garcia Morales, Ed. InTech, 2011. doi: 10.5772/16441.
- [19] P. Miranda, V. Rafael. "Diseño e implementación de un sistema de posicionamiento terrestre utilizando protocolo Zigbee para proveer de un sistema de seguridad en el barrio Santa Lucia Centro del cantón Tisaleo," Departamento de Eléctrica y Electrónica. Carrera de Ingeniería en Electrónica e Instrumentación. ESPE. Extensión Latacunga, 2013.
- [20] M. Á. N. Sobrino y J. V. Román, "Sistema de localización en redes wi-fi basado en fingerprint," Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Telemática, Madrid, España, 2009.
- [21] "Productos y servicios IoT - Dispositivos inalámbricos, módulos de sistema y ordenadores de placa única para el desarrollo de las exigentes aplicaciones IoT | Digi International," [Online]. Available: <https://es.digi.com/products>.
- [22] JS Lee, Su. YW and Shen. CC, "A comparative study of wireless protocols: Bluetooth UWB ZigBee and WiFi," *Proceedings of the 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp. 46-51, November 2007
- [23] J. Rugeles, "Técnicas de localización de nodos inalámbricos mediante redes de sensores," in *Decimo Segunda Conferencia Iberoamericana de Sistemas, Cibernética e Informática*, Orlando, FL, jul. 2013.
- [24] D. G. Bertoli y A. R. Carrión, "Estudio, implementación y análisis de métodos de trilateración para la localización de usuarios desde sus terminales móviles," p. 156.
- [26] J. Figueiras, "Fundamentals of Positioning en *Mobile Positioning and Tracking*, Chichester," UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2017, pp. 81-107. doi: 10.1002/9781119068846.ch4.
- [28] J. J. Santana, "Localización en interiores con redes de sensores mediante técnicas de fingerprinting," Universidad De Murcia, Facultad De Informática, Murcia, España, 2016.
- [29] M. J. M. Ayora, "Aplicación de una red inalámbrica de sensores para detección de presencia y conteo," Universidad de Sevilla, departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Sevilla España, 2015.
- [30] J. Hightower y G. Borriello, "Location Sensing Techniques," sep. 2001.
- [31] T. Gädeke, J. Schmid, W. Stork, y K. Müller-Glaser, "Pedestrian Dead Reckoning for Person Localization in a Wireless Sensor Network," ene. 2011.
- [32] C. Han, W. Zhongtao and W. Longxu, "Indoor Positioning System Based on Zigbee and Inertial System," *2018 5th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA)*, 2018, pp. 80-85, doi: 10.1109/DSA.2018.00023.
- [33] J. C. Aguilar, "Personal indoor localization using smartphone multi-sensing probability map and floor-plan layout information," *Tech. Rep.*, December 2013.
- [34] U. Rehman and S. Cao, "Augmented-Reality-Based Indoor Navigation: A Comparative Analysis of Handheld Devices Versus Google Glass," in *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 47, no. 1, pp. 140-151, Feb. 2017, doi: 10.1109/THMS.2016.2620106.



- [35] M. Sugano, T. Kawazoe, Y. Ohta, y M. Murata, "Indoor localization system using RSSI measurement of wireless sensor network based on ZigBee standard," *Wirel. Opt. Commun.*, pp. 1-6, ene. 2006.
- [36] Q. Chen, H. Liu, M. Yu and H. Guo, "RSSI ranging model and 3D indoor positioning with ZigBee network," *Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, 2012, pp. 1233-1239, doi: 10.1109/PLANS.2012.6236979.
- [37] G. Aponte, *Fundamentos De Matemáticas Básicas*. Pearson Educación, 1998.
- [38] J. M. H. Rábanos, L. M. Tomás, y J. M. R. Salís, *Comunicaciones móviles*. Editorial Universitaria Ramon Areces, 2015.
- [39] K. Pahlavan, X. Li, y J.-P. Mäkelä, "Indoor geolocation science and technology," *Commun. Mag. IEEE*, vol. 40, pp. 112-118, mar. 2002, doi: 10.1109/35.983917.
- [40] Digi International, 2015, [online] Available: <http://www.digi.com>.
- [41] C. P. Vega, J. M. Z. S. de la Maza, y A. C. López, *Sistemas de telecomunicación*. Ed. Universidad de Cantabria, 2007.
- [42] ZigBee Alliance, 2015, [online] Available:<http://www.zigbee.org>
- [43] M. F. Triola, *Estadística*. Pearson Educación, 2004.
- [44] Á. De-La-Llana-Calvo, J. Lázaro, A. Gardel, D. Rodriguez, I. Bravo, y F. Zapata, "Sistema de Posicionamiento en Interiores Basado en Iluminación LED y Sensor PSD," jul. 2019.