

ANÁLISIS DE LA EXACTITUD AL EMPLEAR RFID COMO TECNOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN EN INTERIORES



**PAULO CÉSAR CHÁVEZ TOBAR
NATALIA PAREDES ORDÓÑEZ**

Director: MSc. Víctor Fabián Miramá Pérez

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas-GRIAL
Línea de Investigación en Sistemas de Comunicaciones Móviles e
Inalámbricos
Popayán, Cauca
2022

ANÁLISIS DE LA EXACTITUD AL EMPLEAR RFID COMO TECNOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN EN INTERIORES

**PAULO CÉSAR CHÁVEZ TOBAR
NATALIA PAREDES ORDÓÑEZ**

Trabajo de grado presentado a la Facultad de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones de la
Universidad del Cauca para optar al título de:
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones.

Director: MSc. Víctor Fabián Miramá Pérez

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas-GRIAL
Línea de Investigación en Sistemas de Comunicaciones Móviles e
Inalámbricos
Popayán, Cauca
2022**

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. GENERALIDADES	3
<i>1.1 Localización o posicionamiento en interiores</i>	3
1.1.1 Parámetros de desempeño	5
1.1.2 Fenómenos que afectan el funcionamiento de los IPS	6
<i>1.2 Tecnologías Inalámbricas para la Localización en Interiores</i>	7
1.2.1 Infrarrojo	7
1.2.2 Wi-Fi	8
1.2.3 Bluetooth	8
1.2.4 ZigBee	8
1.2.5 Identificación por Radiofrecuencia	9
1.2.6 Banda Ultra-Ancha	9
1.2.7 Ultrasonido	9
<i>1.3 Conceptos fundamentales de RFID</i>	10
1.3.1 Componentes de un sistema RFID	10
1.3.2 Frecuencias de trabajo	12
1.3.3 Principios de funcionamiento	13
1.3.4 Estándares y protocolos	14
<i>1.4 Técnicas para la localización en interiores</i>	17
1.4.1 Proximidad	18
1.4.2 <i>Fingerprinting</i>	18
1.4.3 Triangulación	20
1.4.4 Trilateración	21
1.4.5 Multilateración	22
1.4.6 <i>Dead Reckoning</i>	23
1.4.7 <i>Vision Analysis</i>	24
<i>1.5 Métricas para la localización en interiores</i>	25
1.5.1 Indicador de intensidad de señal	25
1.5.2 Ángulo de llegada	26
1.5.3 Tiempo de Llegada	27
1.5.4 Diferencia de Tiempo de Llegada	28
1.5.5 Tiempo de Retorno de Vuelo	29

2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL ESCENARIO DE LOCALIZACIÓN EN INTERIORES	31
2.1 Descripción de requerimientos	32
2.1.1 Requerimientos funcionales	32
2.1.2 Requerimientos no funcionales.....	32
2.2 Diseño Rápido.....	32
2.2.1 Análisis y selección de la métrica y técnica para la localización en interiores	33
2.2.2 Frecuencia de trabajo	36
2.2.3 Diseño propuesto	38
2.2.4 Selección de dispositivos	45
2.3 Construcción del prototipo.....	50
2.3.1 Hardware.....	50
2.3.2 Software	51
2.4 Configuración inicial	54
2.4.1 Potencia de trabajo.....	54
2.4.2 Ajuste del valor de referencia RSSI y del exponente de pérdidas n	55
2.4.3 Calibración del escenario de pruebas	57
3. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	61
3.1 Pruebas de exactitud del prototipo empleando multilateración y K-NN.....	61
3.2 Pruebas de exactitud del prototipo con una persona portando las etiquetas dentro del escenario	65
3.2.1 Recorrido por el escenario de pruebas a partir de las rutas fijas establecidas ..	66
3.2.2 Recorrido libre por el escenario de pruebas.....	69
4. ANÁLISIS DE LA EXACTITUD	72
4.1 Resultados de las pruebas de exactitud del prototipo empleando multilateración y K-NN	72
4.2 Resultados de las pruebas de exactitud del prototipo con una persona portando las etiquetas dentro del escenario	74
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	79
5.1 Conclusiones.....	79
5.2 Trabajos futuros	80

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Componentes de un Sistema de Posicionamiento en Interiores.	4
Figura 1.2. Fases generales del proceso de localización.	4
Figura 1.3. Componentes de un lector RFID.	11
Figura 1.4. Componentes de una etiqueta.	11
Figura 1.5. Acoplamiento inductivo.	14
Figura 1.6. Acoplamiento capacitivo.	14
Figura 1.7. Técnica de Proximidad.	18
Figura 1.8. Técnica de Triangulación.	21
Figura 1.9. Trilateración.	22
Figura 1.10. Multilateración con cuatro puntos de referencia.	23
Figura 1.11. Pedestrian Dead Reckoning.	24
Figura 1.12. Localización en interiores con cámara móvil (izquierda) o con cámaras estáticas (derecha).	24
Figura 1.13. Localización basada en AoA.	26
Figura 1.14. Localización basada en ToA.	28
Figura 1.5. Localización basada en TDoA.	29
Figura 1.16. Representación de RToF.	30
Figura 2.1. Fases del Modelo de Prototipado.	31
Figura 2.2. Medidas del escenario de pruebas (izquierda) y distribución de las coordenadas del escenario de pruebas (derecha).	38
Figura 2.3. Esquema modular del prototipo.	38

Figura 2.4. Diagrama de flujo general del prototipo de localización en interiores.	40
Figura 2.5. Multilateración y filtro K-NN.	41
Figura 2.6. Diagrama de flujo de multilateración.	42
Figura 2.7. Multilateración.	43
Figura 2.8. Diagrama de flujo del filtro K-NN.	44
Figura 2.9. Filtro K-NN.	45
Figura 2.10. Lector RU420B.	46
Figura 2.11. Polarización circular sentido antihorario y horario.	47
Figura 2.12. Antena XCAF-12L.	47
Figura 2.13. Patrón de radiación.	48
Figura 2.14. Conexión de los cuatro nodos con el lector.	50
Figura 2.15. Conexión del recurso computacional y el lector SR-RU420B.	51
Figura 2.16. Información de la lectura de la etiqueta Impinj Monza 3 AD-833.	52
Figura 2.17. Escenario real de pruebas.	53
Figura 2.18. Escenario para la selección de la potencia de trabajo.	54
Figura 2.19. Escenario para encontrar los valores de RSSI por cada distancia.	55
Figura 2.20. Índice de pérdidas de propagación para cada etiqueta.	57
Figura 2.21. Mapa fingerprint para la etiqueta A.	58
Figura 2.22. Mapa fingerprint para la etiqueta B.	59
Figura 2.23. Mapa fingerprint para la etiqueta C.	60
Figura 3.1. Resultados de la multilateración.	63
Figura 3.2. Resultados al ejecutar el filtro K-NN.	65
Figura 3.3. Persona dentro del escenario de pruebas.	66
Figura 3.4. Rutas fijas establecidas dentro del escenario.	67

Figura 3.5. Resultados de los recorridos.	68
Figura 3.6. Resultados del recorrido 4.	69
Figura 3.7. Resultados del recorrido 5.	70
Figura 4.1. Gráficas de CDF.	73
Figura 4.2. Gráficas de CDF para la segunda prueba de la etiqueta A.	75
Figura 4.3. Gráficas de CDF para la segunda prueba de la etiqueta B.	76
Figura 4.4. Gráficas de CDF para la segunda prueba de la etiqueta C.	77

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Clasificación de las etiquetas.	16
Tabla 2.1. Comparación entre las métricas para la localización.	37
Tabla 2.2. Comparación entre las técnicas para el posicionamiento.	39
Tabla 2.3. Análisis de la frecuencia de trabajo de un sistema RFID.	40
Tabla 2.4. Especificaciones.	50
Tabla 2.5. Especificaciones de la antena.	51
Tabla 2.6. Etiquetas seleccionadas.	53
Tabla 2.7. Especificaciones ISO/IEC 18000-6C EPCGlobal Class 1 Generation 2.	53
Tabla 2.8. Promedio de valores obtenidos para cada etiqueta.	58
Tabla 3.1. Error promedio para los recorridos 4 y 5.	75
Tabla 4.1. Resumen de resultados de exactitud.	80

LISTA DE ACRÓNIMOS

ANN	<i>Artificial Neural Networks</i> , Redes Neuronales Artificiales.
AoA	<i>Angle of Arrival</i> , Ángulo de Llegada.
ASIC	<i>Application Specific Integrated Circuit</i> , Circuito Integrado de Aplicación Específica.
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Amplitud.
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i> , Bluetooth de Baja Energía.
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i> , Función de Distribución Acumulada.
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i> , Código de Redundancia Cíclica.
DSB-ASK	<i>Double Sideband Amplitude Shift Keying</i> , Modulación de Doble Banda Lateral por desplazamiento de amplitud.
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read Only Memory</i> , ROM Programable y Borrable Eléctricamente.
EKF	<i>Extended Kalman Filter</i> , Filtro Kalman Extendido.
EPC	<i>Electronic Product Code</i> , Código Electrónico de Producto.
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Frecuencia.
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i> , Entradas/Salidas de Propósito General.
GPS	<i>Global Positioning System</i> , Sistema de Posicionamiento Global.
HF	<i>High Frequency</i> , Alta Frecuencia.
IPS	<i>Indoor Positioning System</i> , Sistema de Posicionamiento en Interiores.
IR	<i>Infrared</i> , Infrarrojo.

ISO	<i>International Organization for Standardization, Organización Internacional de Estandarización.</i>
ITF	<i>Interrogator Talks First, Interrogador/Lector Habla Primero.</i>
ITM	<i>Identifier Tag Memory, Memoria de la Etiqueta Identificadora.</i>
KF	<i>Kalman Filter, Filtro Kalman.</i>
K-NN	<i>K-Nearest Neighbor, K-Vecinos más Cercanos.</i>
LF	<i>Low Frequency, Baja Frecuencia.</i>
LoS	<i>Line of Sight, Línea de Vista.</i>
MTU	<i>Maximum Transmission Unit, Unidad de Transmisión Máxima.</i>
NLoS	<i>Non Line of Sight, Sin Línea de Vista.</i>
NN	<i>Nearest Neighbor, Vecino más Cercano.</i>
PC	<i>Protocol Control, Control de Protocolo.</i>
PER	<i>Packet Error Rate, Tasa de Error de Paquete.</i>
PIE	<i>Pulse-Interval Encoding, Codificación por Intervalo de Pulsos.</i>
PPM	<i>Pulse Position Modulation, Modulación por Posición de Pulso.</i>
PR-ASK	<i>Phase Reversal Amplitude Shift Keying, Modulación por Fase Inversa por desplazamiento de amplitud.</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying, Modulación por Desplazamiento de Fase.</i>
RAM	<i>Random Access Memory, Memoria de Acceso Aleatorio.</i>
RF	<i>Radio Frequency, Radiofrecuencia.</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification, Identificación por Radiofrecuencia.</i>
ROM	<i>Read Only Memory, Memoria de Sólo Lectura.</i>
RSS	<i>Received Signal Strength, Intensidad de Señal Recibida.</i>

RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i> , Indicador de Intensidad de Señal Recibida.
RTof	<i>Return Time of Flight</i> , Tiempo de Vuelo de Retorno.
SMC	<i>Sequential Monte Carlo</i> , Monte Carlo Secuencial.
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido.
SSB-ASK	<i>Simple Sideband Amplitude Shift Keying</i> , Modulación de Banda Lateral Única por desplazamiento de amplitud.
TDoA	<i>Time Difference of Arrival</i> , Diferencia de tiempo de llegada.
ToA	<i>Time of Arrival</i> , Tiempo de Llegada.
ToF	<i>Time of Flight</i> , Tiempo de Vuelo.
TOTAL	<i>Tag Only Talks After Listening</i> , Etiqueta Sólo Habla Después de Escuchar.
TRL	<i>Techonology Readiness Level</i> , Nivel de Madurez Tecnológica.
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> , Frecuencia Ultra Alta.
UWB	<i>Ultra Wide-Band</i> , Banda Ultra-Ancha.
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> , Red de Área Local Inalámbrica.
WMRM	<i>Write Many Read Many</i> , Múltiples Escrituras y Múltiples Lecturas.
WORM	<i>Write Once Read Many</i> , Una Sola Escritura y Múltiples Lecturas.

INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de localización inalámbricas han tenido un papel importante en la navegación, detección y seguimiento de objetos o personas, vigilancia de objetos y demás servicios basados en la ubicación. Los sistemas de localización se pueden clasificar dependiendo del escenario en el que van a ser implementados, como: interiores y exteriores. Para la localización en exteriores, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS, *Global Positioning System*) se ha utilizado para la navegación terrestre, marítima y aérea, en el rastreo y recuperación de vehículos, estudios geodésicos para la búsqueda y rescate de personas en áreas poco accesibles, entre otra gama de aplicaciones [1]. Sin embargo, esta tecnología no funciona bien en interiores por la falta de visión directa entre los dispositivos y los satélites que conforman el sistema, además las señales emitidas se atenúan considerablemente al atravesar las paredes y obstáculos de edificios, casas, centros comerciales, aeropuertos, universidades y hospitales. Por ello, el GPS es ineficaz para la localización en interiores y es necesario buscar nuevas alternativas.

En los últimos años se ha trabajado continuamente en investigaciones y desarrollo de proyectos de sistemas de localización en interiores que han brindado soluciones a un conjunto de desafíos tales como: espacios reducidos, influencia de obstáculos y paredes en la propagación de las señales, y movimiento constante dentro del escenario. La localización en interiores de personas, objetos o animales se ha basado en tecnologías como: ultrasonido, infrarrojo, sensores láser y señales de radiofrecuencia, cada uno de estos sistemas cumplen con ciertos requerimientos como alta flexibilidad, seguridad, usabilidad, autenticación de usuarios, y registrar, almacenar y actualizar la información de manera constante [2].

La mayoría de las implementaciones actuales de sistemas de localización en interiores usan tecnologías de radio para su cometido, ya que poseen la capacidad de penetrar hasta cierto punto las paredes y obstáculos que pueden encontrarse en interiores. Una de las tecnologías más destacadas es la Identificación por Radiofrecuencia (RFID, *Radio Frequency Identification*), la cual se ha extendido a un gran número de aplicaciones, desde identificación y seguimiento de animales, personas y objetos, hasta la seguridad y control de acceso en organizaciones, ofreciendo múltiples lecturas simultáneas de la información contenida en las etiquetas, sin la necesidad de contacto físico entre los dispositivos. Debido a que es una tecnología basada en radiofrecuencia, es fundamental el empleo de estándares internacionales que especifican los diferentes protocolos de comunicación para el intercambio de información lector-etiqueta y modos de operación que regulan el uso del espectro para lograr un funcionamiento adecuado [3], [4].

Estimar la localización con un alto porcentaje de exactitud mediante el uso de esta tecnología, constituye un reto, dado que los componentes que conforman el sistema RFID están expuestos a interferencias, donde la propagación de las ondas radio en interiores se ve afectada por los obstáculos que generan multitrayectoria y reflexión,

además se pueden presentar colisiones cuando hay varias etiquetas dispuestas dentro del área de cobertura del lector, ocasionando problemas en la transmisión de la información [5], [6].

Por estas razones, se deben considerar las diferentes técnicas y métricas para lograr obtener resultados óptimos en la estimación de la localización de objetos o personas, la solución a diseñar busca evaluar la exactitud al emplear RFID como tecnología para localización en interiores.

La estructura del documento es la siguiente:

En el capítulo 1, se introduce el concepto de Sistema de Localización en Interiores (IPS, *Indoor Positioning System*), los parámetros de desempeño y los fenómenos que afectan a un IPS. Se realiza una descripción de las diferentes tecnologías inalámbricas actuales que utilizan estos sistemas, así como también, las técnicas y métricas más empleadas para obtener estimaciones de localización adecuadas.

En el capítulo 2, se presenta el desarrollo metodológico para el diseño e implementación del prototipo, en esta, se describen los requerimientos, el diseño rápido, la construcción del prototipo y su evaluación.

En el capítulo 3, se describen las pruebas realizadas con el prototipo de localización en interiores basado en RFID con los respectivos resultados.

En el capítulo 4, se exponen el análisis de la exactitud para cada uno de los resultados de las pruebas descritas en el capítulo anterior.

En el capítulo 5, se describen las conclusiones y líneas futuras del trabajo de grado, donde se incluyen las posibles mejoras del prototipo planteado.

Por último, se detalla toda la bibliografía utilizada en el desarrollo del trabajo de grado.

1. GENERALIDADES

En este capítulo se introduce el concepto de Sistemas de Posicionamiento en Interiores (IPS, *Indoor Positioning System*), se describen los parámetros de desempeño y los fenómenos que afectan el funcionamiento. Se explican las tecnologías inalámbricas más utilizadas para la localización en interiores haciendo especial énfasis en la Identificación por Radiofrecuencia (RFID, *Radio Frequency Identification*). Finalmente se explican las técnicas y métricas empleadas en la localización en interiores que permiten aumentar la exactitud.

1.1 Localización o posicionamiento en interiores

Los términos posición y localización son frecuentemente usados para denotar conceptos iguales, pero existe una diferencia entre su significado. La posición se expresa cuantitativamente como un conjunto de coordenadas numéricas y la localización es cualitativa e indica las características o la relación que existe entre un objeto o persona con un determinado espacio [7]. En el desarrollo del trabajo de grado estos términos son tomados indiscriminadamente.

Un IPS considera solo escenarios cerrados, tales como: centros comerciales, hospitales, edificios y gimnasios, donde las señales de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, *Global Positioning System*) no proporcionan una estimación de localización confiable. Un IPS es un sistema que de forma continua y en tiempo real determina la posición de algo o alguien en un escenario cerrado, de esta manera un IPS debería funcionar todo el tiempo a menos que el usuario apague el sistema u ocurra algún tipo de daño [8]. Un IPS se compone de un conjunto de dispositivos empleados para intercambiar señales que son procesadas para finalmente estimar la localización del objetivo. A su vez, un IPS cuenta con un programa que recoge todas las mediciones y ejecuta un algoritmo para estimar la posición del objeto o persona. En comparación con los escenarios exteriores, los escenarios interiores son más complejos porque hay presencia de múltiples obstáculos que reflejan las señales produciendo multitrayectoria y retardos que generan errores en las mediciones. Además, las características o geometría del escenario, el movimiento constante de personas y el mobiliario causan distorsión de la señal [8], [9].

Los componentes generales de un IPS se presentan en la Figura 1.1, los cuales operan al interior de un escenario previamente establecido con puntos de referencia y nodos fijos, la información de estos puntos y nodos es almacenada en el sistema de control para luego ser procesada junto con la información de las señales que son intercambiadas entre los nodos fijos y los objetivos a localizar [10].

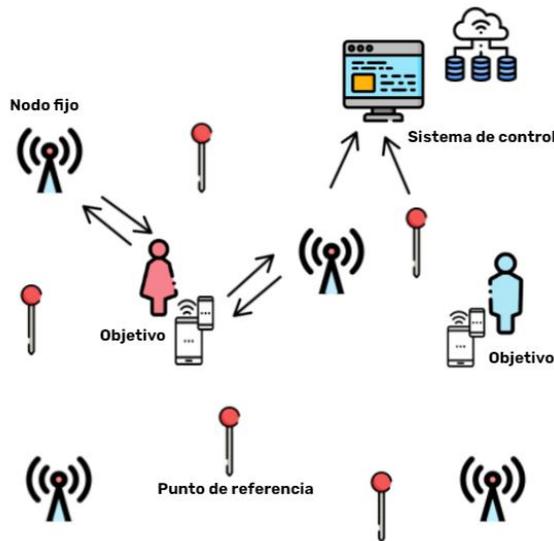


Figura 1.1. Componentes de un Sistema de Posicionamiento en Interiores [11].

A partir de la descripción de la Figura 1.1, el proceso de localización se puede dividir en dos pasos como se muestra en la Figura 1.2, donde la primera fase es la medición de la señal y la segunda es la estimación de la localización. Durante la primera fase, las señales emitidas por los objetivos son percibidas por los nodos fijos dentro del escenario de pruebas, los cuales captan uno o varios parámetros de las señales y envían la información al sistema de control. En la segunda fase, la localización del objetivo se determina a partir de dichos parámetros y de la información de los puntos de referencia, es aquí donde el sistema de control ejecuta un algoritmo para estimar la localización [1].

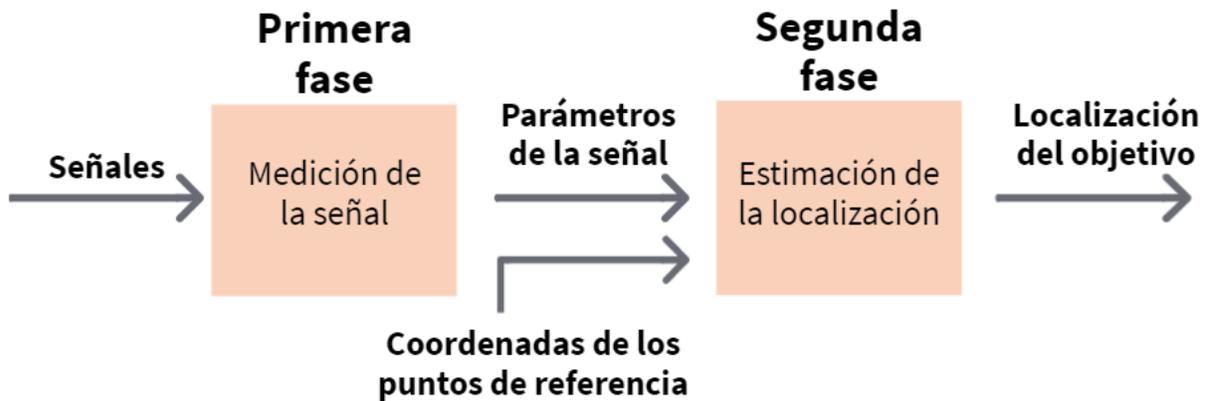


Figura 1.2. Fases generales para estimar la localización [1].

1.1.1 Parámetros de desempeño

Las aplicaciones de IPS varían en características, condiciones del escenario, costos y demás factores que aumentan la complejidad del sistema, es por esto, que los parámetros de desempeño juegan un papel importante en el funcionamiento de cada aplicación para hacer frente a los diversos retos y dificultades que se presentan; los principales parámetros de desempeño son descritos a continuación:

Exactitud: es la diferencia entre la estimación realizada y el valor real donde se encuentra localizado el objetivo. La exactitud también se llama error de localización, entre menor sea este valor en términos absolutos, mejor será el funcionamiento del IPS [5], [12].

Precisión: se refiere a la dispersión entre las diferentes estimaciones, es decir, el grado de coincidencia que existe entre las estimaciones de un mismo punto para encontrar la localización del objeto o persona. La precisión generalmente se expresa numéricamente con medidas de dispersión como la desviación típica o la varianza, es por ello, que entre más estrecha sea la distribución de los resultados, menor será la desviación y mayor será la precisión de la medida [5], [13].

Rango de cobertura: hace referencia al área que cubre el sistema de localización en interiores, cada uno de estos sistemas tiene un rango en particular.

En general, para la localización en interiores existen dos categorías en las que se puede clasificar el sistema: cobertura local y escalable. La cobertura local es un área pequeña, bien definida y limitada, como una sola habitación, piso o edificio, mientras que la cobertura escalable se refiere a la capacidad de un sistema para aumentar el área integrando nuevo hardware, sin que se vea afectada la exactitud en las mediciones, lo que implica aumento de costos. Hoy en día, los rangos de IPS existentes suelen ser de 5 a 50 m, ya que rangos mayores a 50 m son difíciles de implementar por los efectos que puede sufrir la señal por la propagación en escenarios cerrados [9].

Disponibilidad: es el porcentaje de tiempo durante el cual el servicio de posicionamiento está disponible para su uso con alta exactitud en las mediciones. Esto se puede ver limitado por fallas aleatorias, por ejemplo, por la congestión o por la complejidad del procesamiento de la información en los algoritmos [9].

Tiempo de respuesta: Es el intervalo de tiempo desde que las señales son percibidas por los transmisores hasta que la información es procesada y el sistema proporcione la estimación de la localización. Este tiempo depende de los dispositivos que se estén empleando, de la complejidad de los algoritmos, de la cantidad de información a procesar y de la capacidad del sistema de control [5].

Complejidad computacional: es la cantidad de recursos requeridos durante el cálculo para resolver un problema, así, un cálculo difícil requerirá más recursos que

uno de menor dificultad. Los recursos comúnmente estudiados son el tiempo (número de pasos de ejecución de un algoritmo para resolver un problema) y el espacio (cantidad de memoria utilizada para resolver un problema). Si un cálculo requiere más tiempo que otro decimos que es más complejo y lo llamamos complejidad temporal. Por otro lado, si un cálculo requiere más espacio de almacenamiento que otro se dice que es más complejo, en este caso hablamos de una complejidad espacial [5].

1.1.2 Fenómenos que afectan el funcionamiento de los IPS

Las señales que se propagan en escenarios cerrados experimentan variaciones en la amplitud, el ángulo y en la velocidad de propagación, alterando la forma de la señal debido a la presencia de obstáculos que afectan las estimaciones de la localización. Esto ocasiona que al receptor llegue una versión degradada de la señal original, por lo tanto, es necesario conocer los principales fenómenos que se presentan en interiores. A continuación, se exponen dichos problemas.

Atenuación: es la pérdida de energía o potencia de la señal debido a las imperfecciones o características del medio de propagación, se incrementa conforme aumenta la distancia o la frecuencia. La influencia de los materiales de construcción y la ubicación del mobiliario causan atenuación de la señal a medida que se propaga por el edificio, casa, centro comercial u otro escenario cerrado. Cuando aparecen obstáculos entre el transmisor y el receptor, la atenuación aumenta porque estos absorben parte de la energía de la señal, entre más obstáculos deba atravesar la señal, mayores serán las pérdidas y, por tanto, los resultados se verán afectados obteniendo estimaciones erróneas de la localización [14].

Reflexión: se produce cuando una onda choca con un obstáculo de grandes dimensiones en comparación con la longitud de onda de la señal. Este absorbe parte de la energía de la onda y refleja otra parte de ella en otra dirección. La señal reflejada puede ser distinta a la señal original, dependiendo de las características del obstáculo como su geometría, textura y composición, y de las propiedades de la señal, como el ángulo de incidencia, orientación y longitud de onda [15].

Difracción: se genera cuando la señal es obstruida por una superficie irregular, como la esquina de una habitación, generando frentes de ondas secundarios en distintas direcciones. En los escenarios cerrados existen varios objetos con superficies irregulares que producen una mayor o menor difracción de la señal, además la amplitud y la fase de la onda incidente deben ser consideradas para analizar el efecto de este fenómeno [14].

Dispersión: ocurre cuando en el camino la señal se encuentra con objetos cuyas dimensiones son pequeñas comparadas a la longitud de onda. El resultado es que la señal se “divide” o dispersa en múltiples direcciones. La mayoría de las construcciones de edificios modernos contienen vigas de hierro forjado en su estructura, además los materiales de los conductos para los servicios eléctricos y de tuberías pueden aumentar el efecto de la dispersión [16].

Multitrayectoria: es un efecto que sufre una señal transmitida por un dispositivo al tomar varias trayectorias o caminos diferentes hasta llegar al receptor, donde este recibe distintas versiones con retardos de la señal original. En los escenarios cerrados, la señal se propaga a través de los vidrios de ventanas, paredes y muebles, estos obstáculos causan variaciones en la señal y se generan réplicas, las cuales se combinan en el receptor lo que puede provocar una señal difusa y aumentar errores en los resultados [15], [16].

1.2 Tecnologías Inalámbricas para la Localización en Interiores

Seleccionar la tecnología apropiada para la localización en interiores es sumamente importante, ya que se debe encontrar un equilibrio entre complejidad y desempeño para cumplir con los requerimientos establecidos. Estas tecnologías han sido clasificadas de diferentes maneras por múltiples investigadores. Una de estas clasificaciones depende del medio de transmisión que emplean, por ejemplo, tecnologías basadas en luz como la Infrarrojo (IR, *Infrared*), señales de Radiofrecuencia (RF, *Radio Frequency*) tales como Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, Identificación por Radiofrecuencia (RFID, *Radio Frequency Identification*) y Banda Ultra Ancha (UWB, *Ultra Wide Band*) y tecnologías basadas en sonido como es el caso del Ultrasonido [17].

A continuación, se presentan las tecnologías inalámbricas más utilizadas en el desarrollo de la localización en interiores.

1.2.1 Infrarrojo

Emplea radiación electromagnética con longitudes de onda mayores que el espectro de luz visible. Un sistema simple que emplee esta tecnología está compuesto por un diodo emisor de luz infrarroja y un fotodiodo receptor para detectar y recibir los pulsos de luz transmitidos por el diodo [18].

La tecnología Infrarroja se ha utilizado de varias maneras para detectar o localizar objetos o personas. Existen tres métodos generales para emplear estas señales: configuración activa, utilizando radiación natural o fuentes de luz artificial. La configuración activa se basa en receptores infrarrojos fijos que se encuentran ubicados en diferentes puntos de referencia y dispositivos móviles cuyas ubicaciones se desconocen. Los sistemas de localización basados en la radiación infrarroja natural o configuración pasiva pueden ser utilizados para determinar de forma remota la temperatura de los objetos o personas sin necesidad de usar etiquetas o emisores y los sistemas basados en fuentes de luz artificial implementan cámaras especiales para estimar la ubicación o detectar el objetivo.

La exactitud de emplear esta tecnología para la localización en interiores se ve afectada por la presencia de obstáculos, ya que este tipo de comunicaciones requiere de línea de vista entre transmisor y receptor para garantizar un correcto funcionamiento. Sin embargo, en algunas ocasiones las señales reflejadas en las paredes pueden tener la potencia suficiente para llegar al receptor [3], [5].

1.2.2 Wi-Fi

La mayoría de los teléfonos inteligentes, computadores, y demás dispositivos actuales cuentan con opciones de conectividad con Wi-Fi, lo que hace a esta tecnología una buena opción para la localización en interiores. Sin embargo, las redes Wi-Fi son implementadas para la comunicación, por lo tanto, requieren algoritmos eficientes que permitan un desempeño adecuado con el objetivo de ser implementados para la estimación de la localización.

El estándar 802.11ax, abre la puerta a mejorar dicha exactitud. Una opción para la localización en interiores por medio de Wi-Fi es por medio de *ArrayTrack*, en el cual se emplean puntos de acceso con múltiples antenas para recibir los cambios de parámetros dentro de las señales y así localizar los objetivos con mayor exactitud [19]. Es el primer sistema de localización Wi-Fi capaz de alcanzar una exactitud de menos de medio metro, ya que es un sistema robusto en términos de Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*), colisión y orientación del dispositivo.

1.2.3 Bluetooth

Bluetooth es una tecnología de comunicación inalámbrica entre dispositivos de corto alcance, se considerada como el gran competidor de Wi-Fi desde la adopción de Bluetooth de Baja Energía (BLE, *Bluetooth Low Energy*), debido a que es compatible con la mayoría de teléfonos inteligentes, tiene bajo costo y bajo consumo de energía; además, BLE puede proporcionar una velocidad de datos mejorada de 24Mbps y un rango de cobertura entre 70 y 100 metros con una mayor eficiencia energética comparada con versiones anteriores.

Un sistema de localización en interiores basado en BLE utiliza dispositivos transmisores llamados *beacons*, estos detectan señales radio recibidas por el sistema de control que permite determinar una ubicación aproximada del objetivo y rastrear objetos o personas. Aunque un *beacon* es suficiente para detectar la presencia del objetivo, no puede determinar su ubicación específica. Generalmente la exactitud en la localización mejora con el aumento de los *beacons* instaladas en el área de interés [20], [21].

1.2.4 ZigBee

ZigBee se creó originalmente para aplicaciones con baja velocidad de transmisión tales como la automatización de hogares, control de semáforos, reanimación, agricultura, entre otras. En los últimos años esta tecnología ha sido empleada para el

desarrollo de IPS debido a sus características de bajo costo, bajo consumo de energía y hardware sencillo [22].

Esta tecnología proporciona una mayor confiabilidad al emplear una topología de red en malla, lo cual permite que algunos de los nodos de la red estén inactivos, mientras que otros se encargan del control de la propagación de las señales para evitar problemas [23]. Dicha topología está formada por varios sensores que actúan como receptores y transmisores para estimar la localización del objetivo en interiores siguiendo el estándar IEEE 802.15.4 [18].

1.2.5 Identificación por Radiofrecuencia

Es una tecnología empleada para el almacenamiento y procesamiento de datos almacenados en dispositivos remotos denominados etiquetas, permitiendo la identificación de objetos, animales o personas. Se basa en el intercambio de diferentes señales radio entre dos componentes principales: lectores y etiquetas. Las etiquetas pueden clasificarse en activas, pasivas o semi-activas, las primeras cuentan con una batería interna y capacidad de transmitir señales de manera autónoma, mientras que las pasivas no cuentan con una fuente de energía integrada para la transmisión de datos y, de igual manera, las semi-activas, poseen una fuente de energía integrada, pero transmiten los datos empleando una energía capturada por inducción desde el lector.

La tecnología permite lecturas simultáneas de datos, para lo cual los sistemas RFID implementan mecanismos de detección de colisiones [18]. La tecnología RFID tiene aplicaciones muy amplias que se han utilizado para la localización en interiores, ya que permite identificar o rastrear objetos o personas sin la necesidad de un contacto directo entre el transmisor y el receptor [24].

1.2.6 Banda Ultra-Ancha

Esta tecnología utiliza un ancho de banda amplio comparado con los que usualmente emplean las demás tecnologías, permitiendo alcanzar relativamente altas velocidades de transmisión de datos [25]. Se basa en la transmisión de pulsos muy cortos, de una duración aproximada de 1 ns, además, la señal pasa fácilmente a través de paredes, equipos y ropa. Sin embargo, los materiales metálicos y líquidos pueden causar alteraciones en la señal UWB.

Se ha demostrado que la tecnología UWB trae múltiples ventajas para la localización en interiores, puede proporcionar una excelente exactitud incluso en la presencia de multitrayectoria severa utilizando un circuito de detección especial de alta capacidad para captar los pulsos cortos de las señales, por lo que su implementación es altamente costosa [12], [26].

1.2.7 Ultrasonido

Ultrasonido es aquel rango de frecuencia de ondas electromagnéticas superior a los 20kHz capaz de ser transmitido a través de distintos materiales con baja densidad molecular, empleada dicha tecnología en distintos campos de la industria moderna, entre las cuales se resalta localización debido a que no interfiere con las ondas electromagnéticas, no penetra paredes sólidas, no requiere línea de visión directa entre los dispositivos y tiene un alcance relativamente corto. Como es una tecnología que no penetra paredes sólidas se pueden presentar pérdidas en la señal debido a la obstrucción, reflexiones e interferencias causadas por las altas frecuencias [17].

Los sistemas implementados utilizando esta tecnología para la localización pueden alcanzar exactitudes considerables para el seguimiento y localización de personas u objetos dentro áreas pequeñas, para la implementación de este tipo de sistemas para la localización en áreas grandes se pueden dividir dicho entorno en varias zonas para incrementar la exactitud, cobertura y que no existan grandes pérdidas de señal, esto puede resultar costoso por la gran cantidad de dispositivos que deben ser utilizados [22].

1.3 Conceptos fundamentales de RFID

RFID utiliza la radiación de ondas electromagnéticas como principio físico al igual que las ondas radio presentes en nuestro alrededor, aprovechando la energía electromagnética. Es una tecnología inalámbrica que puede realizar la identificación de cualquier tipo de objeto o persona mediante la comunicación bidireccional entre un lector y una etiqueta.

1.3.1 Componentes de un sistema RFID

Un sistema RFID está conformado por dos elementos: un lector y una etiqueta.

1.3.1.1 Lector o interrogador

Es un dispositivo electrónico encargado de transmitir ondas radio a la etiqueta para que esta envíe la información que tiene almacenada y, posteriormente, recibirla, procesarla y verificarla. El lector consta de un módulo de radiofrecuencia, una unidad de control conformada por un microprocesador y una interfaz de comunicación, y una antena para realizar la comunicación con la etiqueta. Además, incorpora una interfaz a un *host* o controlador a través de un enlace local o remoto, el cual puede ser RS-232, RS-485, Ethernet o una Red de Área Local Inalámbrica (WLAN, *Wireless Local Area Network*) que permite enviar los datos de la etiqueta al sistema de control [27], [28].

Como se muestra en la Figura 1.3, el módulo de RF consta de un transmisor que genera y emite la señal y un receptor que la recibe a través de la antena que habilita

la comunicación entre el lector y la etiqueta. La unidad de control cuenta con un microprocesador encargado de implementar el protocolo de lectura para comunicarse con las etiquetas, el cual codifica y decodifica los datos y realiza la verificación de errores de las señales; por su parte la interfaz de comunicación cuenta con instrucciones que permiten la interacción con entidades externas o *host* para transferir información y recibir comandos [28].

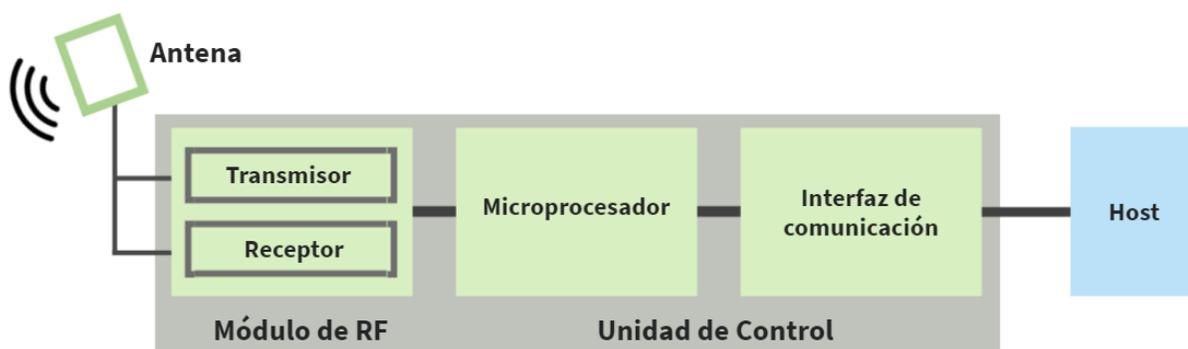


Figura 1.3. Componentes de un lector RFID [29].

1.3.1.2 Etiquetas

Es un dispositivo que cuenta con una antena y un chip de memoria en el que se almacena la información del objeto. El chip incluye una circuitería analógica encargada de la transmisión de datos por medio de RF y de proporcionar la alimentación; una circuitería digital para la lógica de control y seguridad, y una memoria para almacenar datos que puede ser Memoria de Sólo Lectura (ROM, *Read Only Memory*), Memoria de Acceso Aleatorio (RAM, *Random Access Memory*) o una memoria de programación no volátil, suele tratarse de una ROM Programable y Borrable Eléctricamente (EEPROM, *Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*). Por su parte, la antena permite la transmisión de los datos almacenados en el chip, el tamaño de esta es crítico para el funcionamiento de la etiqueta porque normalmente determina el rango de lectura de la etiqueta. En la Figura 1.4 ilustra las partes de una etiqueta RFID [28].

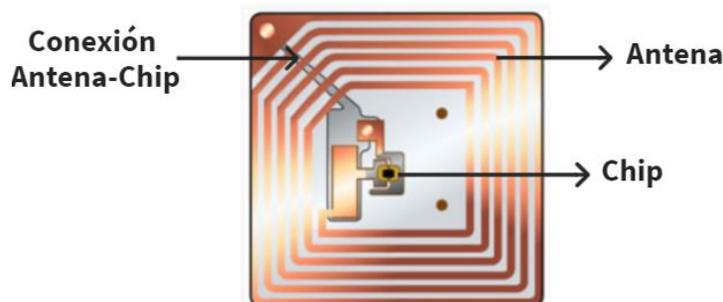


Figura 1.4. Componentes de una etiqueta [29].

De acuerdo con la fuente de energía utilizada por las etiquetas, se pueden clasificar en pasivas, activas o semi-activas. Las pasivas no cuentan con una fuente de alimentación propia, es por ello por lo que aprovechan la energía radiada por él, para generar su propia señal y responder al lector; estas etiquetas pueden llegar a ser muy económicas y pequeñas, pero las lecturas a largas distancias son muy limitadas. Sin embargo, a pesar de estas limitaciones, las etiquetas pasivas ofrecen mejores ventajas en términos de costo y vida útil [30].

El tipo de etiquetas activas disponen de una fuente de alimentación integrada, lo cual aumenta su capacidad de almacenamiento de información y de transmitir periódicamente la señal de identificación. Aunque su antena es de pequeño tamaño, la señal que radia puede alcanzar una distancia de hasta decenas de metros. En términos generales las etiquetas RFID activas permiten un radio de cobertura mayor, mejor inmunidad al ruido y tasas de velocidad de transmisión de datos más altas, esto se traduce como un mayor costo de implementación.

Las etiquetas semi-activas, tienen una fuente de energía integrada, la cual energiza a la etiqueta para su operación, pero para transmitir datos se utiliza la energía radiada por el lector, por esto, pueden ser leídas a mayores distancias comparadas con las etiquetas pasivas [27].

1.3.2 Frecuencias de trabajo

Los elementos de un sistema RFID pueden trabajar en diferentes rangos de frecuencias según sea el caso de aplicación, como la Frecuencia Baja (LF, *Low Frequency*), Frecuencia Alta (HF, *High Frequency*), Frecuencia Ultra Alta (UHF, *Ultra High Frequency*) y Frecuencia de microondas, estas son descritas a continuación:

A. Frecuencia baja

Las aplicaciones que pueden ser implementadas en el rango de los 120-134 KHz son de corto alcance (aproximadamente menor a 0,3 m), por ejemplo, el control de acceso al personal humano de una empresa, identificación de ganado, gestión de bienes o como soporte a la producción en la industria. La capacidad de almacenamiento de datos es baja, (para etiquetas pasivas es de alrededor de 64 bits y para activas de hasta 2 kbits). Las tasas de velocidad de transmisión típicas están entre los 200 bps a 1 kbps. Los dispositivos de LF utilizan menos energía y pueden penetrar de mejor manera los materiales compuestos por metales y líquidos.

B. Frecuencia alta

La frecuencia para las etiquetas a alta frecuencia es de 13.56 MHz con un alcance máximo es de 0,9 m y puede ser utilizado en el área de inventarios o en sistemas de anti-hurto en los supermercados, aeropuertos, bibliotecas y servicios de alquiler. La capacidad de almacenamiento es desde 512 bits hasta 8 kbits y la velocidad de transmisión suele ser de 25 kbps.

C. Frecuencia ultra alta

Las aplicaciones operan en 860-960 MHz con un alcance de 2-5 metros para sistemas pasivos y de 10-12 metros para activos, ambos con la posibilidad de hacer lecturas simultáneas de varias etiquetas. Esta banda es apta para aplicaciones de trazabilidad, localización y seguimiento de objetos o personas, logística de cadena de suministros o en aplicaciones de seguridad y velocidad de transmisión de datos de 28 kbps o superior y la capacidad de almacenamiento de datos típica de 32 bits hasta los 4 kbits.

D. Frecuencia de microondas

Trabaja en el rango de 2.45-5.8 GHz y generalmente son aplicaciones con etiquetas activas en la gestión de producción de automóviles, logística militar y cadenas de suministros. La capacidad y la velocidad es mucho mayor que las otras bandas, aproximadamente de 128 bits a 512 kbits y de 100 kbps a 1 Mbps, respectivamente [28], [31], [32].

1.3.3 Principios de funcionamiento

El acoplamiento es el modo en el que la etiqueta y el lector realizan el intercambio de datos. Existen dos técnicas para entablar la comunicación: el acoplamiento inductivo mediante métodos de modulación de carga y el acoplamiento capacitivo mediante la reflexión. Estos métodos son descritos a continuación.

1.3.3.1 Acoplamiento inductivo

También se le conoce como acoplamiento por campo cercano. El lector activa las etiquetas mediante un campo magnético generado cuando una corriente alterna circula a través de la bobina de su antena. Este campo magnético induce una corriente sobre la antena de la etiqueta para activar su chip y comenzar la transmisión de datos. Las etiquetas utilizan la modulación de carga para enviar datos de vuelta al lector, además, la intensidad de un campo magnético disminuye significativamente con la distancia entre los dispositivos, por lo que los sistemas inductivos son intrínsecamente de corto alcance [32], [33].

En la Figura 1.5 se muestra cómo el condensador se conecta en paralelo con la antena del lector, generando grandes corrientes debido a la resonancia del circuito paralelo permitiendo la comunicación entre lector y la etiqueta, este circuito trabaja en la misma frecuencia del lector. Este tipo de acoplamiento es generalmente empleado en bandas de LF y HF y son sistemas pasivos o semi-activos [27].

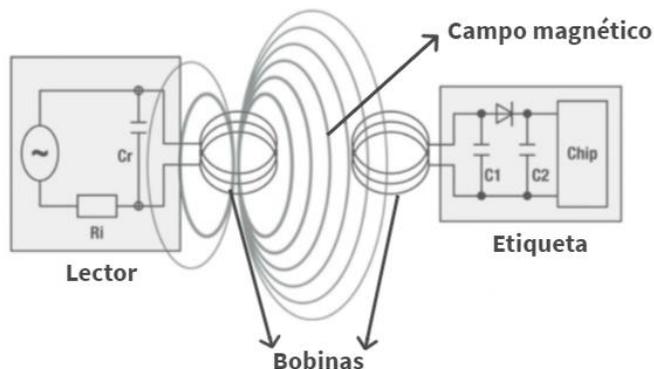


Figura 1.5. Acoplamiento inductivo [33].

1.3.3.2 Acoplamiento capacitivo o *backscatter*

Generalmente los IPS que operan con este principio tienen alcances típicos entre 3 a 6 metros en etiquetas pasivas. Una etiqueta pasiva no tiene energía propia, por lo que utiliza la señal de RF de la antena del lector para alimentar los circuitos internos. La Figura 1.6 ilustra el acoplamiento capacitivo o backscatter que consta de una etiqueta y un lector, el cual emite una señal de RF que es recibida por la antena de la etiqueta para activar el chip o el Circuito Integrado de Aplicación Específica (ASIC, *Application Specific Integrated Circuit*). Dicha señal es modulada al cambiar la impedancia de entrada entre dos estados creando un patrón de unos y ceros que corresponden el código de identificación de la etiqueta, para luego ser enviada de vuelta al lector [33], [34].

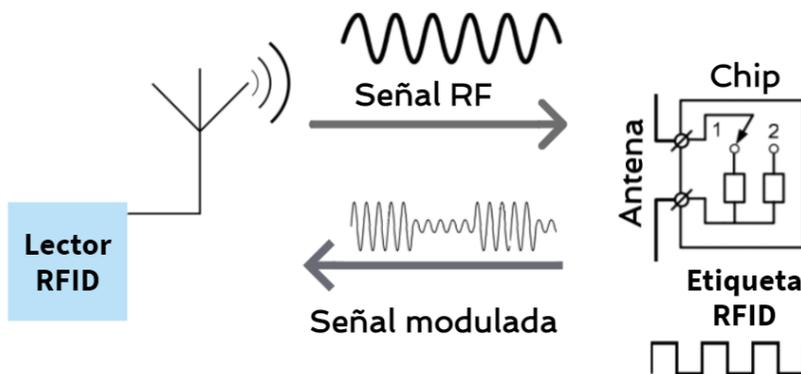


Figura 1.6. Acoplamiento capacitivo [34].

1.3.4 Estándares y protocolos

En el proceso de regulación tienen gran importancia los organismos que desarrollan los diferentes estándares con los que RFID cuenta hoy en día. La estandarización es absolutamente necesaria para asegurar la interoperabilidad y conseguir la adopción masiva de RFID. Adicionalmente, los estándares RFID describen métodos de prueba

y protocolos para el intercambio de datos entre los dispositivos. La Organización Internacional de Estandarización (ISO, *International Organization for Standardization*) y la organización EPCGlobal (EPC, *Electronic Product Code*) han desarrollado la mayoría de los estándares para la tecnología RFID, los cuales son descritos a continuación.

1.3.4.1 ISO

ISO ha desarrollado estándares de RFID para la identificación automática y la gestión de objetos. La serie de estándares de ISO relacionada con RFID y las frecuencias que se emplean en dichos sistemas es *ISO/IEC 18000: Information Technology – Radio Frequency Identification for Item Management*. Esta serie contiene siete partes diferentes¹, que definen una línea de trabajo para los protocolos de comunicación comunes a nivel internacional en el uso de RFID [32].

- A. *ISO/IEC 18000-1: Information Technology – Radio Frequency Identification for Item Management - Part 1: Reference Architecture and Identification of Parameters to be Standardized* [35].
- B. *ISO-IEC 18000-2: Information Technology – Radio Frequency Identification for Item Management - Part 2: Parameters for Air Interface Communications Below 135 KHz* [36].
- C. *ISO-IEC 18000-3: Information Technology – Radio Frequency Identification for Item Management - Part 3: Parameters for Air Interface Communications at 13.56 MHz* [37].
- D. *ISO-IEC 18000-4: Information Technology – Radio Frequency Identification for Item Management - Part 4: Parameters for Air Interface Communications at 2.45 GHz* [38].
- E. *ISO-IEC 18000-6: Information Technology – Radio Frequency Identification for Item Management - Part 6: Parameters for Air Interface Communications at 860 MHz to 960 MHz* [39].
- F. *ISO-IEC 18000-7: Information Technology – Radio Frequency Identification for Item Management - Part 7: Parameters for Air Interface Communications at 433 MHz* [40].

La sexta parte de la norma es la más importante en la tecnología RFID, la cual describe los protocolos, comandos a utilizarse entre el lector y las etiquetas y la gestión de las colisiones. Está conformada por cuatro tipos diferentes de protocolos: A, B, C y D, los cuales cuentan con su tipo específico de codificación y modulación con el objetivo de establecer la comunicación entre los componentes del sistema.

¹ La quinta parte del estándar fue abandonada debido a la falta de uso e interés global.

Los protocolos A, B y C son para sistemas basados en la tecnología “Interrogador Habla Primero” (ITF, *Interrogator Talks First*). El tipo A utiliza la Codificación por Intervalo de Pulsos (PIE, *Pulse-Interval Encoding*) en el enlace directo, es decir, del lector a la etiqueta y para las colisiones emplea un mecanismo basado en ALOHA. El tipo B, utiliza codificación Manchester en el enlace directo y un algoritmo de árbol binario adaptativo. Ambos tipos utilizan codificación FM0 (*FM, Frequency modulation Type Zero*) para el enlace de retorno, de la etiqueta al lector, a 40 o 160 kbps. El tipo C usa PIE en el enlace directo y en el enlace de retorno utiliza codificación Miller, además emplea el Algoritmo Q para detectar colisiones. Por último, el tipo D solo es usado por etiquetas con tecnología “Etiqueta Habla Solo Después de Escuchar” (TOTAL, *Tag Only Talks After Listening*) y se basa en la Modulación por Posición de Pulso (PPM, *Pulse Position Modulation*) [39].

1.3.4.2 EPCGlobal

El EPC permite la identificación en tiempo real de cualquier producto, en cualquier empresa de cualquier parte del mundo. El código EPC en una etiqueta RFID puede identificar al fabricante, producto, versión y número de serie, y adicionalmente provee un grupo de dígitos extra para identificar objetos únicos [33].

El estándar EPC divide las etiquetas usadas en seis tipos diferentes, dependiendo de su funcionalidad, como se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Clasificación de las etiquetas [32], [33], [41].

Clase	Generación	Descripción
<i>Class 0</i>	Gen 1	Etiquetas pasivas ROM que se pueden programar sólo una vez, pero se pueden leer muchas veces. Banda UHF, con 64 o 96 bits de EPC.
<i>Class 0+</i>	Gen 1	Modificación de <i>class 0</i> . Etiquetas de Una Sola Escritura y Múltiples Lecturas (WORM, <i>Write Once Read Many</i>)
<i>Class 1</i>	Gen 1 y Gen 2	Etiquetas WORM para Gen 1 y etiquetas de Múltiples Escrituras y Múltiples Lecturas (WMRM, <i>Write Many Read Many</i>) para Gen 2. Banda HF o UHF, con mínimo 256 bits de memoria de los cuales 96 son para el EPC.
<i>Class 2</i>	Gen 2	Etiquetas pasivas WMRM con uso extendido de memoria y control de acceso por autenticación.

Class 3	Gen 2	Etiquetas semi-activas que pueden soportar comunicaciones en banda ancha [32]. Tienen sensores incorporados para registrar datos de temperatura, presión y movimiento.
Class 4	Gen 2	Etiquetas activas que pueden establecer comunicación con otras etiquetas de la misma clase o con las class 5 sin pasar por el lector.
Class 5	Gen 2	Posee las mismas características que las class 4, pero además son capaces de comunicarse con las etiquetas class 1, 2 y 3.

Para suplir las necesidades globales de RFID, EPCGlobal publicó el estándar *EPCGlobal UHF Class 1 Generation 2* o *EPC Gen2* adaptado a nivel mundial en el uso de los sistemas de RFID [33]. Este estándar incorpora un método que soporta múltiples lectores y permite dos modos de operación: un solo lector y múltiples lectores. Además, *EPC Gen2* cuenta con mayores velocidades de transmisión del orden de 80 a 640 Kbps, la escritura y lectura de etiquetas es rápida y flexible.

El intercambio de datos entre el lector RFID y la etiqueta puede emplear varios esquemas de modulación tales como: como Modulación por Desplazamiento de Amplitud (ASK, *Amplitude Shift Keying*), Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK, *Frequency Shift Keying*) y Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK, *Phase Shift Keying*). Al tratarse de un sistema basado en *EPCglobal UHF Class 1 Generation 2* la comunicación desde el lector hacia la etiqueta debe usar modulaciones ASK, de Doble Banda Lateral por desplazamiento de amplitud (SSB-ASK, *Simple Sideband Amplitude Shift Keying*) o de Fase Inversa por desplazamiento de amplitud (DSB-ASK, *Double Sideband Amplitude Shift Keying*), de Banda Lateral Única por desplazamiento de amplitud (PR-ASK, *Phase Reversal Amplitude Shift Keying*). En la comunicación desde la etiqueta hacia el lector se debe enviar una señal modulada por ASK o por PSK y codificada en formato banda base FM0 o codificación Miller, en lugar de PIE. En ambos casos el método usado para comunicarse es semiduplex [32], [42].

1.4 Técnicas para la localización en interiores

Además de las tecnologías de localización en interiores, existen varias técnicas que se encargan de obtener la posición del objetivo a partir de alguna característica de la señal recibida.

Actualmente existen varias técnicas de estimación para la localización en interiores, cada una tiene ventajas e inconvenientes según las características del escenario de aplicación. Un sistema que utiliza más de una técnica al mismo tiempo se conoce como

sistema híbrido y alcanzan exactitudes de estimación mucho más altas que los sistemas donde solo se emplea una técnica [25].

1.4.1 Proximidad

Es la más sencilla de implementar, se basa en una red de antenas o detectores con posiciones conocidas. Cuando varios de estos dispositivos detectan un objetivo, se considera que está cerca al que recibe la señal con más potencia [25], [43].

Como se muestra en la Figura 1.7, E_2 y E_3 son los objetivos, D es un dispositivo de referencia con un área de cobertura representada por el rectángulo y solo puede captar señales de E_2 , por lo tanto, E_3 está próximo o cerca de D, y E_3 está por fuera del área de cobertura.

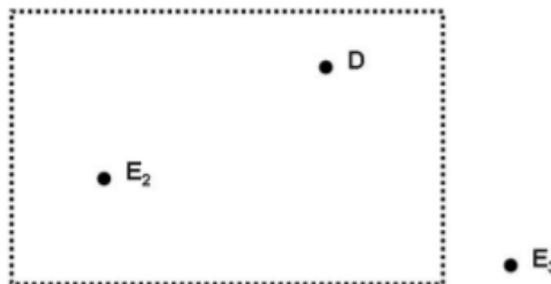


Figura 1.7. Técnica de Proximidad [8].

Esta técnica no puede proporcionar estimaciones exactas, solo indica si se encuentra dentro de un área o no y el margen de error es mayor en comparación con otras técnicas.

1.4.2 Fingerprinting

Esta técnica consta de dos fases para obtener la localización del objetivo. La primera es la Fase de Calibración o Fase de Entrenamiento (*Off-Line Calibration Phase*) y la segunda es la Fase de Localización (*On-Line Position Determination Phase*). En la fase de entrenamiento se construye el mapa *fingerprint* o la base de datos *fingerprint*, a partir de las coordenadas e información de los puntos de referencia dispuestos dentro del escenario. Estos puntos deben ser significativos y contar con una cantidad mínima que permitan una exactitud mayor en las estimaciones.

En la segunda etapa, la fase de localización, se toman ya las medidas de los parámetros provenientes del dispositivo a localizar, donde se compara estos valores medidos con la base de datos para la estimación de la localización.

El principal inconveniente que presenta esta técnica es que la intensidad de señal podría verse afectada por la reflexión, dispersión y difracción en la propagación en escenarios cerrados, por esto, la fase de calibración debe repetirse periódicamente. La técnica de *fingerprinting* suele utilizar algún tipo de algoritmo que ayude a mejorar la exactitud en la localización. Algunos de estos algoritmos son: Vecino más Cercano (NN, *Nearest Neighbor*), K-Vecinos más Cercanos (K-NN, *K-Nearest Neighbor*) y Redes Neuronales Artificiales (ANN, *Artificial Neural Networks*), entre otros [8], [9], [31], [43].

A. Vecino más cercano

Luego de registrar las medidas de las señales en la fase de entrenamiento, el algoritmo NN define el vector distancia d_l que contiene las distancias vectoriales respectivas a todos los puntos de medida ($d_p = 1, d_p = 2, \dots$). Después se determina el mínimo ($\min(d_l)$) y se asignan las coordenadas del punto a localizar (p) como se presenta en la ecuación (1.1) [44].

$$d_l = \begin{pmatrix} d_p = 1 \\ d_p = 2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ d_p = k \end{pmatrix} \rightarrow \min(d_l) \rightarrow p \quad (1.1)$$

B. K-Vecinos más cercanos

En este algoritmo todas las distancias euclidianas medidas son ordenadas de forma ascendente, con el fin de encontrar los K vecinos más cercanos, es decir, las ubicaciones conocidas más cercanas en el espacio de la señal. Al promediar estas K posibles ubicaciones, se obtiene una localización estimada del objetivo [25]. Se calcula la distancia euclidiana entre el vector de ubicación actual y los vectores de la base de datos mediante la ecuación (1.2), donde m corresponde al número de nodos distribuidos en el escenario de prueba y n es el número de puntos de referencia establecidos en la fase *offline*. El parámetro p_j es el valor RSSI de la ubicación actual del i -ésimo objetivo que es recibida por la j -ésima antena receptora o nodo fijo medido en la fase *online* y el parámetro s_{ij} es el vector con las coordenadas y el valor de RSSI de los puntos de referencia almacenado en la base de datos. Luego se seleccionan los K vectores de la base de datos con las menores distancias y se genera el resultado de la posición actual con el promedio de las coordenadas de posición correspondientes a los vectores seleccionados [45].

$$d_j = \sqrt{\sum_{i=1}^m (p_j - s_{ij})^2} \quad j = 1, \dots, n. \quad (1.2)$$

Es importante tener en cuenta el número de puntos de referencia, ya que cuantos más puntos se distribuyan en el espacio del escenario a probar, mayor será el grado de

exactitud. Además, el número de puntos de referencia, el número de nodos fijos, la potencia de transmisión, el tamaño del escenario, el tipo de señal y la variación de hardware son factores que pueden afectar el desempeño del sistema de localización basado en *fingerprinting* [45].

C. Redes neuronales artificiales

Consiste en dos fases, la primera establece en un conjunto de unidades, conocidas como neuronas artificiales, conectadas entre sí para transmitir señales. La información de entrada atraviesa la red neuronal con los valores medidos en la fase de entrenamiento con sus respectivas coordenadas, en dicha red neuronal se realizan diversas operaciones generando unos valores de salida. Durante la segunda fase, un algoritmo de decisión determina la localización del objetivo en función de las medidas tomadas [46].

1.4.3 Triangulación

Esta técnica utiliza las propiedades geométricas de los triángulos para calcular y estimar la localización de los objetos o personas [25].

Generalmente se requiere dos mediciones de ángulos y la distancia entre los puntos de referencia para la estimación de la localización, además necesita hardware adicional, antenas directivas y línea de vista entre el transmisor y los receptores.

Como se muestra en la Figura 1.8, A y B son los nodos de referencia, α y β son los ángulos conocidos y d es la distancia conocida entre los puntos, la estimación de la localización del objetivo C se determina a partir de la intersección de las líneas formadas por la dirección de los ángulos. Además, utilizando la ley de los senos y la suma de los ángulos de un triángulo se calculan las distancias que hay entre los puntos y el objetivo, así como también su ángulo [47].

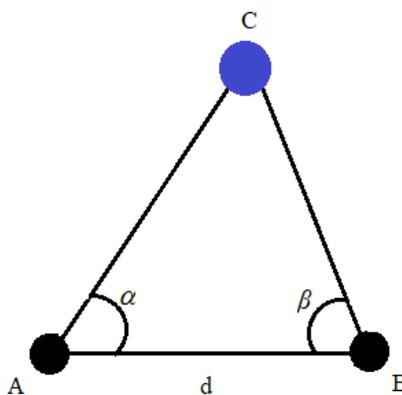


Figura 1.8. Técnica de Triangulación [30].

1.4.4 Trilateración

Es una técnica geométrica que se utiliza para determinar la posición de un objeto o persona a partir de tres puntos de referencia. La distancia entre el objetivo y los puntos de referencia se estiman a partir de una métrica, como la intensidad de señal, el tiempo de llegada o el ángulo de llegada.

La Figura 1.9 describe el esquema de trilateración, donde (x, y) son las coordenadas de ubicación del objetivo. Si solamente se conoce la distancia del objetivo al punto (x_1, y_1) , la posición del objetivo no sería exacta, debido a que se podría encontrar en cualquier lugar del círculo d_1 . Cuando se conocen dos puntos de referencia (x_1, y_1) y (x_2, y_2) , hay dos posibles localizaciones del objetivo a partir de las intersecciones de los círculos, pero no se puede saber cuál de los dos puntos es la verdadera posición, por esto se necesita un tercer punto de referencia. El tercer círculo centrado en (x_3, y_3) forma una intersección con los otros dos y se estima la localización.

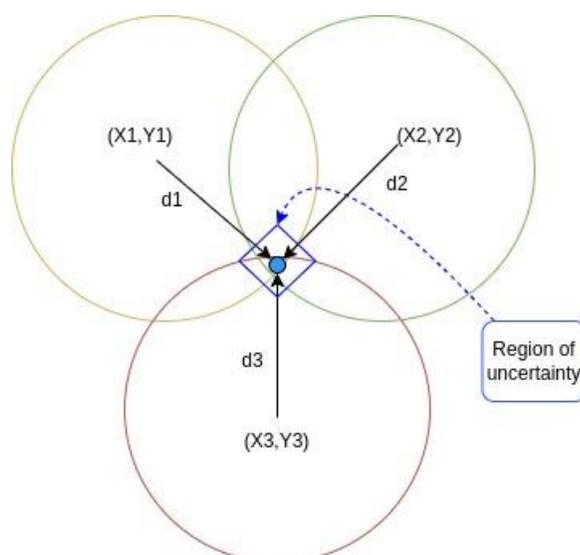


Figura 1.9. Trilateración [48].

A partir del conjunto de ecuaciones que describen las distancias obtenidas por geometría (1.3), se determinan los puntos de intersección para conocer la posible posición del objetivo [48], [49].

$$\begin{aligned}d_1 &= \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \\d_2 &= \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} \\d_3 &= \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2}\end{aligned}\tag{1.3}$$

1.4.5 Multilateración

La multilateración es una técnica que se basa en coordenadas de tres o más puntos de referencia para estimar la localización del objetivo. Al igual que la trilateración, utiliza los parámetros de la señal como el tiempo de llegada o la potencia que se recibe en los dispositivos.

Como se muestra en la Figura 1.10, (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) y (x_4, y_4) son las coordenadas de los nodos fijos A, B, C y D, respectivamente y el punto E es el objetivo con coordenadas desconocidas (x, y) . R_1 , R_2 , R_3 y R_4 son las distancias entre el nodo objetivo E y los puntos A, B, C y D. Estas distancias también representan los radios de los círculos que se forman. R_1 , R_2 , R_3 y R_4 son también los radios de los cuatro círculos con orígenes en A, B, C y D, respectivamente [50].

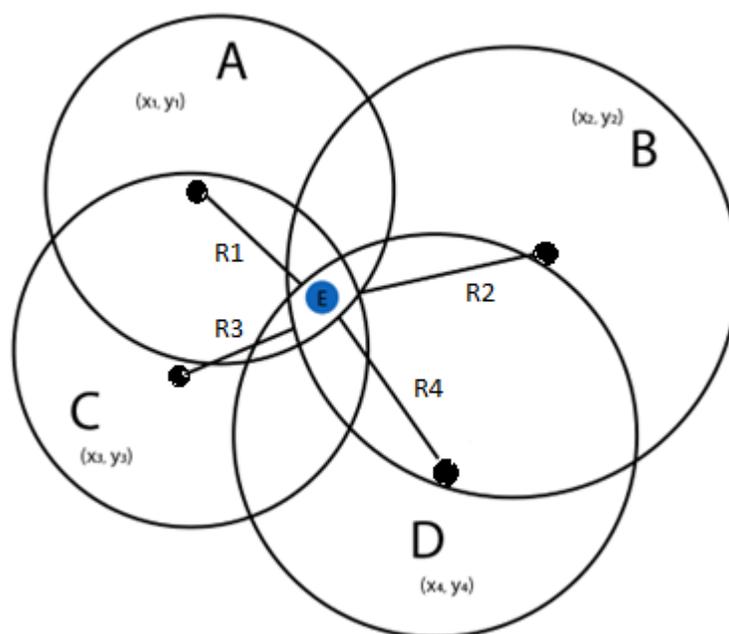


Figura 1.10. Multilateración con cuatro puntos de referencia [50].

Por lo tanto, la localización del nodo sensor se puede calcular resolviendo el sistema de ecuaciones (1.4):

$$\begin{aligned}(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 &= R_1^2 \\(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 &= R_2^2 \\(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 &= R_3^2 \\(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 &= R_4^2\end{aligned}\tag{1.4}$$

Si se utilizan más nodos de referencia, el sistema de ecuaciones de (1.4) puede ser escrito para n puntos como se muestra en (1.5) [50].

$$\begin{aligned}
 (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 &= R_1^2 \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 &= R_n^2
 \end{aligned}
 \tag{1.5}$$

1.4.6 *Dead reckoning*

Esta técnica de localización se basa en ubicaciones previamente determinadas y velocidades conocidas o estimadas durante un lapso de tiempo. Se estima la localización actual de un objeto al conocer la ubicación pasada y la velocidad a la que se mueve. Pasado un tiempo, esta técnica, realiza actualizaciones en las ubicaciones, que pueden ser en forma de coordenadas cartesianas o velocidad, con el fin de mejorar la exactitud y reducir el error en las estimaciones.

Por lo general, para aplicaciones en escenarios interiores, esta técnica funciona por medio de un acelerómetro, un giroscopio y sensores de brújula que pueden estar integrados a un dispositivo, a esto se le conoce como *Pedestrian Dead Reckoning* [43], [51].

El acelerómetro se emplea para distinguir si un usuario está caminando o detenido, ya que es difícil desarrollar un detector de pasos robusto para diferentes formas de andar sin entrenar el modelo para cada usuario. En cambio, la velocidad del usuario se estima en función de la localización por medio de las métricas como la intensidad de señal. Durante la navegación, se espera que un usuario sostenga un teléfono inteligente de tal manera que la orientación del teléfono sea aproximadamente paralela a la dirección del usuario. Por lo tanto, la orientación del teléfono, como lo indican las flechas negras en la Figura 1.11, se puede ver como la dirección en la que camina el usuario. Para representar la orientación del usuario en relación con el borde atravesado, el ángulo entre la dirección de la marcha del usuario y el borde se calcula utilizando datos de giroscopio. El ángulo de dirección se utiliza para saber si el usuario ha modificado correctamente la dirección al girar entre bordes adyacentes y para estimar la velocidad del usuario [51].

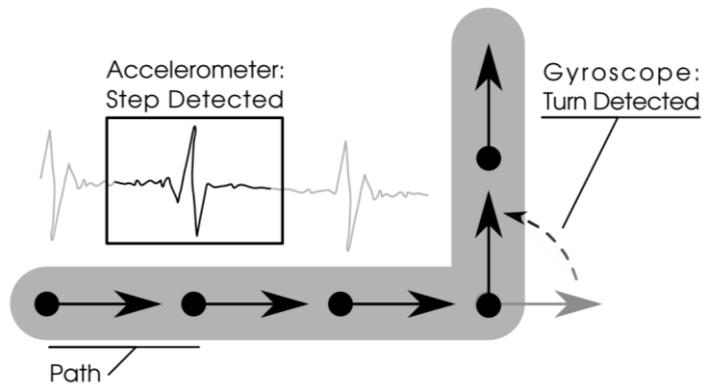


Figura 1.11. Pedestrian Dead Reckoning [51].

1.4.7 Vision analysis

Esta técnica estima la localización a partir de imágenes que son recibidas en uno o más puntos. Por lo general, una o varias cámaras se posicionan en el área de interés para cubrir el espacio y captar imágenes en tiempo real. A partir de estas imágenes los objetivos son identificados. Con la ayuda de una base de datos previamente establecida se realizan las estimaciones de la localización del objetivo [51].

La mayoría de los sistemas utilizan cámaras que lleva el sujeto, que representa la entidad móvil, como una persona o un robot, que se desea localizar, como se muestra en el lado izquierdo de la Figura 1.12. El otro tipo de soluciones usa una infraestructura de cámaras estáticas ubicadas en posiciones conocidas en todo el edificio para rastrear al sujeto, como se muestra en el lado derecho de la Figura 1.12. Los sistemas de localización basados en *Vision analysis* usan cámaras 2D o 3D y estiman la localización mediante la identificación de marcadores artificiales como los códigos de respuesta rápida. En muchos casos, las cámaras se utilizan en combinación con otros sensores como WiFi, beacon o sensores inerciales [43] [51].

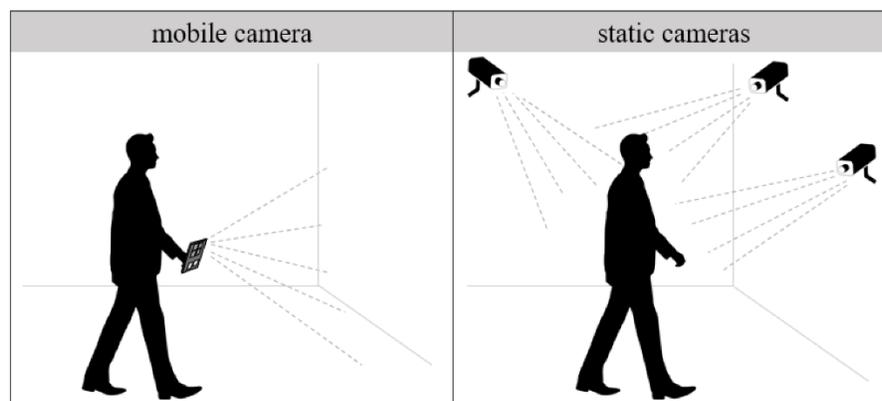


Figura 1.12. Localización en interiores con cámara móvil (izquierda) o con cámaras estáticas (derecha) [43].

1.5 Métricas para la localización en interiores

Un IPS puede estimar la localización del objetivo a partir de información recolectada por un conjunto de dispositivos de detección. Estos dispositivos capturan diferentes parámetros de las señales enviadas desde uno o varios emisores hacia uno o varios receptores o puntos de referencia. Las técnicas emplean los datos recolectados para indicar la dirección aproximada de la señal o para calcular la distancia que existe entre el transmisor y el receptor.

La veracidad de las métricas de localización en interiores depende de la tecnología escogida y de las condiciones de propagación de la señal, esto se debe a que las señales se ven afectadas por la multitrayectoria, la reflexión, ruido y demás inconvenientes que se presentan en escenarios cerrados [18], [52].

En esta sección se describen las métricas que son utilizadas ampliamente para la localización, las cuales son: el Indicador de Intensidad de Señal (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*), el Ángulo de Llegada (AoA, *Angle of Arrival*), el Tiempo de Llegada (ToA, *Time of Arrival*), la Diferencia de Tiempo de Llegada (TDoA, *Time Difference of Arrival*) y el Tiempo de Retorno de Vuelo (RToF, *Return Time of Flight*).

1.5.1 Indicador de intensidad de señal

El RSSI se puede utilizar para estimar la distancia entre el transmisor y un receptor, dado que cuanto mayor es el valor RSS menor es la distancia entre los dispositivos. El valor de RSS es el valor real mientras que RSSI es un indicador, es decir, son valores de RSS promediados durante un cierto periodo.

Utilizando el RSSI y el modelo de propagación de pendiente única, la distancia se puede estimar a partir de (1.6) como:

$$RSSI (dBm) = -10n \log_{10}(d) + A, \quad (1.6)$$

donde n es el exponente para las pérdidas de propagación (el cual toma valores entre 2 y 4 para espacios cerrados) [22], y A es el valor RSSI a una distancia de referencia del receptor [53].

La existencia de múltiples obstáculos como muebles, ventanas y paredes y el movimiento de personas, provocan que las señales se vean afectadas por la multitrayectoria, la reflexión y difracción entre los dispositivos. Por lo tanto, si se desea estimar la localización en escenarios mucho más amplios, el establecimiento de un modelo de propagación puede presentar errores en las estimaciones [22], [31].

1.5.2 Ángulo de Llegada

AoA se define como el ángulo que forma la dirección de propagación de una onda incidente y una determinada dirección de referencia, que se conoce con el nombre de orientación.

Como se muestra en la Figura 1.13, se necesitan dos puntos de referencia (punto A y punto B) con coordenadas conocidas y dos ángulos de incidencia (α_1, α_2) con que llega la señal del objetivo a los puntos formando una unión radial, dicha unión son las líneas de prolongación de los ángulos y la intersección de ellas determina la localización del objetivo [54] [55].

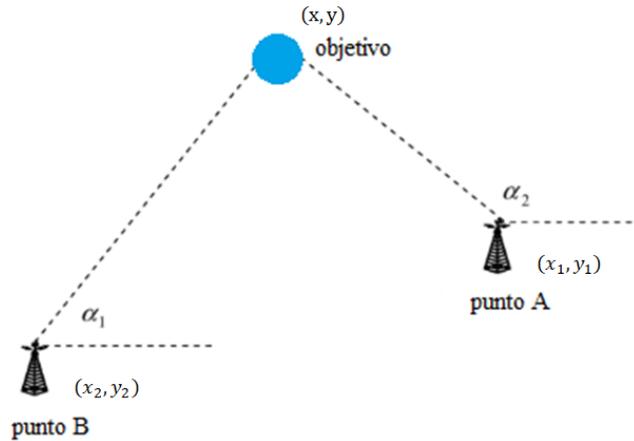


Figura 1.13. Localización basada en AoA [56].

La localización se puede determinar a partir de (1.7), donde α_1 y α_2 representan el ángulo con que llega la señal del dispositivo al punto A y al punto B, (x_1, y_1) , (x_2, y_2) representan las coordenadas de estos puntos y (x, y) son las coordenadas del objetivo.

$$x \tan \alpha_1 - y = x_1 \tan \alpha_1 - y_1 \quad (1.7)$$

$$x \tan \alpha_2 - y = x_2 \tan \alpha_2 - y_2 .$$

Despejando x y y de (1.7) se obtienen el conjunto de ecuaciones dado en (1.8) para encontrar las coordenadas del objetivo [56].

$$x = \frac{x_2 \tan \alpha_2 - x_1 \tan \alpha_1 + y_1 - y_2}{\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1} \quad (1.8)$$

$$y = \frac{\tan \alpha_1 (x_2 \tan \alpha_2 - y_2) - \tan \alpha_2 (x_1 \tan \alpha_1 - y_1)}{\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1}$$

Para esta métrica no es necesaria la sincronización entre los receptores, sin embargo, se necesita un hardware complejo para determinar la ubicación y calibración constante

de dichos equipos. Por otra parte, la exactitud de las diferentes medidas de los ángulos se deteriora al aumentar la distancia entre el transmisor y receptor causando un error en la estimación de la ubicación real del objetivo [18].

1.5.3 Tiempo de llegada

ToF mide el tiempo que tarda una señal en propagarse de un punto a otro, la distancia entre los dos dispositivos se deduce a partir de la multiplicación del tiempo de propagación (la diferencia entre el tiempo inicial con el que se envió la señal y el tiempo con el que la señal llega al punto de referencia) por la velocidad de la onda, en este caso, por la velocidad de la luz [53]. Partiendo de la ecuación (1.9) se calcula la distancia.

$$d = c \times (t_{llegada} - t_{salida}) \quad (1.9)$$

Para encontrar el radio de los círculos de los puntos de referencia a partir de las distancias calculadas en la anterior ecuación, se utiliza la ecuación (1.10).

$$d = \sqrt{(x_{ref} - x)^2 + (y_{ref} - y)^2} \quad , \quad (1.10)$$

donde (x_{ref}, y_{ref}) son las coordenadas conocidas de los puntos de referencia. Una vez obtenido estos radios, se trazan las circunferencias y la localización exacta del objetivo es la intersección de todas ellas.

En la Figura 1.14 el objetivo está rodeado por tres puntos de referencia. Una señal se envía desde el punto 1 hacia el objetivo en t_1 y el objetivo recibe esta señal en t_2 . La distancia (d_1) entre el objetivo y el punto 1 se calcula con la ecuación (1.9), seguido de esto se traza una circunferencia empleando la ecuación (1.10). El proceso se repite para los demás puntos de referencia, de manera que la intersección de los círculos determina la localización del objetivo.

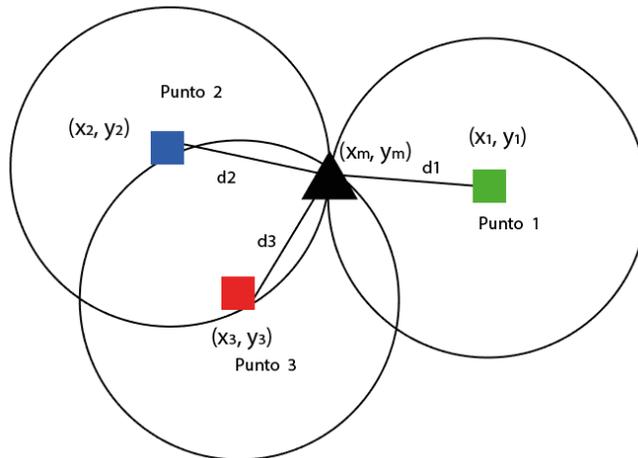


Figura 1.14. Localización basada en ToA [37].

Esta métrica requiere una sincronización temporal entre los dispositivos, un error de nanosegundo en la sincronización se traduce en un error en la distancia de aproximadamente 30 cm, además necesita hardware adicional lo que genera gastos adicionales en la implementación [22], [57].

1.5.4 Diferencia de tiempo de llegada

Mide la diferencia de los tiempos de llegada de una señal transmitida hacia tres o más receptores para obtener la localización del objetivo. Con TDoA, la señal se transmite con un tiempo de inicio desconocido hacia varios receptores o puntos de referencia, estos receptores requieren de una sincronización temporal previa.

Una vez la señal se recibe en los puntos de referencia, la diferencia de tiempo de llegada se emplea para calcular la diferencia en las distancias entre el objetivo y los puntos, siguiendo la ecuación (1.11).

$$Dd = c \times (Dt) \quad (1.11)$$

donde c es la velocidad de la luz y Dt , es la diferencia del tiempo de llegada en cada punto. Cada medición genera una hipérbola, en el espacio en el que se encuentra localizado el dispositivo, usando (1.12).

$$Dd = \sqrt{(x_2 - x)^2 - (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 - (y_1 - y)^2} \quad , \quad (1.12)$$

donde (x_1, y_1) y (x_2, y_2) son las coordenadas conocidas de los puntos de referencia y la intersección de las hipérbolas determina la posible localización del objetivo [12], [58].

En la Figura 1.15, se observa la intersección de las hipérbolas de los puntos de referencia A, B y C para determinar las coordenadas del punto D.

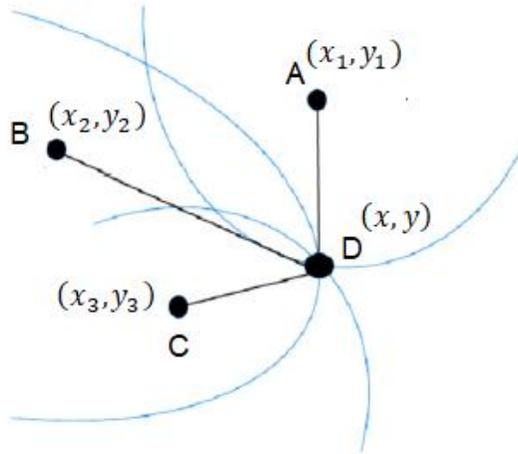


Figura 1.15. Localización basada en TDoA [37].

Al resolver el sistema de ecuaciones de (1.13) se encuentran los puntos (x, y) que corresponden a la estimación del objetivo.

$$\begin{aligned}
 c \times TDoA_{AB} &= \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \\
 c \times TDoA_{BC} &= \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} \\
 c \times TDoA_{AC} &= \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}
 \end{aligned} \tag{1.13}$$

donde $TDoA_{AB}$, $TDoA_{BC}$ y $TDoA_{AC}$ representan la diferencia de tiempo de las señales que llegan a cada uno de los puntos de referencia. Si la sincronización entre estos puntos no es correcta se presentan errores en la estimación [58].

1.5.5 Tiempo de retorno de vuelo

Mide el tiempo de propagación de la señal de ida y vuelta, es decir, el tiempo que tarda en ir desde el transmisor hacia el receptor y desde el receptor al transmisor, para estimar la distancia que existe entre estos. El mecanismo de estimación es similar al de ToA, el transmisor emite una señal, el receptor al recibir esta señal envía una “respuesta” al transmisor el cual calcula el tiempo total de ida y vuelta.

Sea t_1 el momento en que el transmisor envía un mensaje al receptor, este lo recibe en t_2 , $t_2 = t_1 + t_{pro}$ y t_{pro} es el tiempo que tarda el receptor en recibir, procesar y enviar la respuesta, es decir la diferencia entre t_2 y t_3 . El receptor, en el tiempo t_3 , transmite una señal de regreso al emisor que la recibe en t_4 , de modo que la distancia

entre los dispositivos puede calcularse usando la ecuación (1.14). En la Figura 1.16 se muestran los respectivos tiempos de transmisión y recepción de las señales, de esta manera la comunicación es bidireccional.

$$d = \frac{(t_{total} - t_{pro}) \times c}{2} \quad (1.14)$$

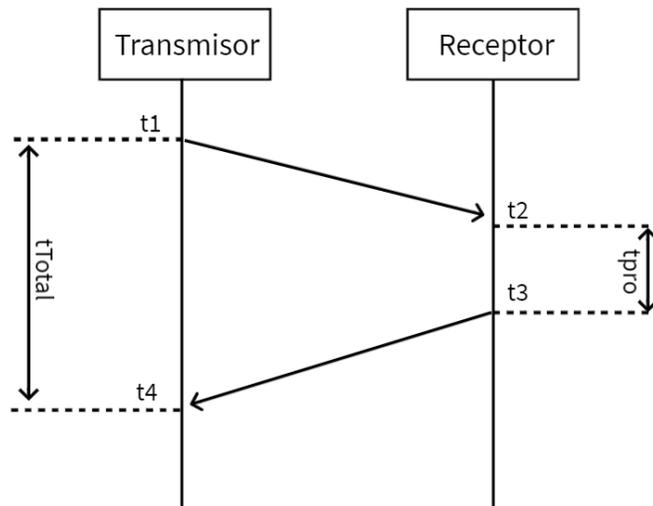


Figura 1.16. Representación de RToF [59].

Esta métrica requiere sincronización entre el transmisor y el receptor para obtener estimaciones con exactitud, sin embargo, pueden existir retardos en la respuesta del receptor [53].

2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL ESCENARIO DE LOCALIZACIÓN EN INTERIORES

En este capítulo se presenta el desarrollo metodológico seleccionado para la elaboración del trabajo de grado. Se utilizó el modelo de prototipado o modelo de desarrollo evolutivo [66], donde se analizan los requerimientos, el escenario de localización, el hardware y software, a su vez, se presentan las pruebas realizadas en el escenario seleccionado y los inconvenientes presentados. La Figura 2.1 presenta las fases del modelo primero se definen los requerimientos teniendo en cuenta los objetivos generales, donde se identifican las funcionalidades para determinar el alcance del trabajo de grado. En la fase de diseño rápido se obtiene una base del prototipo, partiendo de este diseño, se construye el prototipo de manera que cumpla con los requerimientos planteados. Por último, se realizaron diferentes evaluaciones que proporcionaron una retroalimentación necesaria para la entrega final.

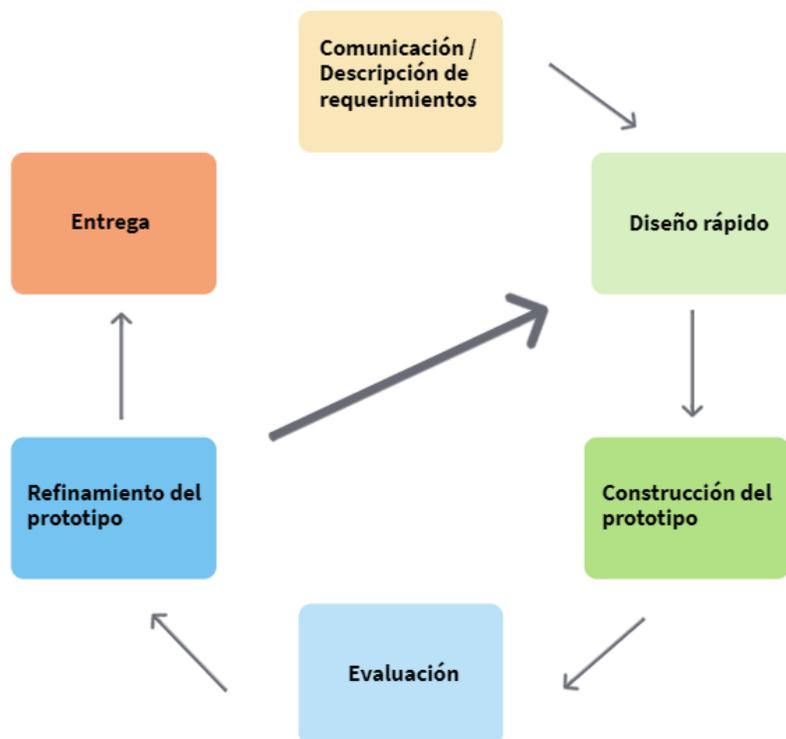


Figura 2.1. Fases del Modelo de Prototipado [67].

Al utilizar este tipo de metodología es necesario clasificar el nivel del prototipo a desarrollar. Se entiende por prototipo a una versión o una solución de un sistema construido en un periodo de tiempo corto, este es fácilmente ampliable y modificable

permitiendo realizar evaluaciones de funcionamiento e implementación para cumplir con los requerimientos [68].

Los prototipos pueden clasificarse según la fidelidad, la funcionalidad y el propósito [69]. Además, es conveniente identificar el Nivel de Madurez Tecnológica (TRL, *Technology Readiness Level*) creado por la NASA en los años 70, donde los proyectos se pueden clasificar en una escala del 1 al 9, siendo 9 el nivel más completo y desarrollado [70]. Según las características del trabajo de grado, el prototipo está en el nivel 1 del TRL, dado que se harán pruebas a escala reducida con la ayuda de algoritmos generales y el análisis de resultados, asimismo no habrá aplicación comercial del prototipo.

2.1 Descripción de requerimientos

Los requerimientos se dividieron en funcionales y no funcionales. Los funcionales son aquellos que describen las actividades o funciones particulares del trabajo y las validaciones que se deben realizar. Los no funcionales determinan las propiedades del sistema, como el desempeño, la disponibilidad, los estándares y protocolos a seguir, la respuesta en el tiempo, entre otros [71]–[73].

2.1.1 Requerimientos funcionales

- Recolectar, procesar y almacenar los datos que permitan la localización de las etiquetas objetivo dentro del escenario propuesto.
- Alcanzar una exactitud de al menos el 75% [74]–[77], es decir, que al menos el 75% de los puntos evaluados presenten errores menores a 1m.
- Obtener errores de exactitud menores a 1 m [78].
- Brindar cobertura en el escenario de implementación.

2.1.2 Requerimientos no funcionales

- Cumplir con los protocolos acordes a la tecnología RFID.
- Procesar y entregar la información en un tiempo menor o igual a 240 ms.
- El sistema de localización debe estar disponible la mayor parte del tiempo.

2.2 Diseño Rápido

Para el diseño del prototipo es importante analizar las métricas y técnicas más empleadas en los IPS para obtener una exactitud adecuada según los requerimientos planteados.

2.2.1 Análisis y selección de la métrica y técnica para la localización en interiores

Para seleccionar la métrica se realizó una tabla de comparación considerando la cantidad de puntos de referencia, la necesidad de sincronización entre los dispositivos, la complejidad de implementación, el error de exactitud promedio y los principales inconvenientes que presentan, para analizar las ventajas y desventajas de cada una y posteriormente escoger la adecuada.

Tabla 2.1. Comparación entre las métricas para la localización [1], [2], [58], [79]–[82].

Métrica/ Característica	RSSI	AoA	ToA	TDoA	RTof
Cantidad mínima de puntos de referencia	3	2	3	3	3
Requiere de sincronización	No	No	Sí (transmisor y receptor)	Sí (receptores)	Sí (transmisor y receptor)
Complejidad de implementación del hardware	Baja	Alta	Alta	Alta	Alta
Uso con RFID	Alto	Medio	Medio	Medio	Bajo
Error de exactitud promedio	1 - 3 m	<0,5 m	<1 m	< 1 m	<1 m
Problemas	Se pueden presentar errores en las estimaciones por la multitrayectoria.	Requiere arreglos de antenas y algoritmos complejos, al aumentar la distancia entre los dispositivos hay errores en la medición de los ángulos [80].	Hay errores de sincronización que producen retardos por lo que es fundamental que la señal tenga una marca de tiempo.	Requiere de gran ancho de banda. Si hay errores en la sincronización de los dispositivos se disminuye la exactitud.	Presencia de retardos de procesamiento que afectan el desempeño.

Teniendo en cuenta la Tabla 2.1, las métricas ToA, TDoA y RToF requieren sincronización entre los dispositivos, lo que implica un aumento en la complejidad del hardware y en costos de implementación, además se pueden generar retardos reduciendo la exactitud, ya que un pequeño error en temporización genera un gran error en el cálculo de la distancia.

La propagación NLoS afecta a todas estas métricas, sin embargo, al emplear AoA se puede generar un error en el cálculo del ángulo y se traduce en un gran error en la estimación de la localización del dispositivo, asimismo al usar ToA, TDoA y RToF los obstáculos desvían las señales emitidas provocando un aumento en el tiempo que tarda la señal en propagarse del transmisor al receptor, los errores en las estimaciones son un gran inconveniente en la exactitud para la localización en interiores. Por su parte, RSSI no necesita de sincronización entre los dispositivos por lo que no hay retardos que puedan afectar las estimaciones, los errores por el multitrayecto pueden mitigarse al implementar filtros, mayor número de puntos de referencias y múltiples mediciones [53]. Además, para evitar los errores al utilizar AoA, TDoA, ToA y RToF, se recomienda un mayor ancho de banda por lo que estas métricas son altamente empleadas en los sistemas de UWB [83].

La métrica RSSI es más sencilla de implementar en comparación con las demás métricas debido a que no hay necesidad de adicionar hardware complejo que incrementan los costos y el consumo de energía. Puede ser aplicada en cualquier tipo de escenario dado que el cálculo de distancias está basado en un modelo de propagación y el valor de potencia se puede medir en la gran mayoría de los dispositivos que se encuentran en el mercado [84]. Teniendo en cuenta lo anterior, esta métrica es la más indicada para el desarrollo del trabajo de grado al ser de bajo costo, no requerir hardware adicional, fácil de implementar en cualquier escenario de pruebas y no es necesaria la sincronización ni un gran ancho de banda o altos consumos de energía.

De igual manera, para la selección de la técnica se emplea una tabla donde se comparan la cantidad mínima de puntos de referencias, las métricas asociadas, la complejidad de los cálculos matemáticos y si se requiere de hardware adicional.

Tabla 2.2. Comparación entre las técnicas para el posicionamiento [25], [51].

Técnica/ Característica	Multilateración	Trilateración	Triangulación	Proximidad	<i>Finger printing</i>	<i>Dead Reckoning</i>	<i>Vision Analysis</i>
Cantidad mínima de nodos fijos	3	3	2	3	1 ²	1 ³	1
Métrica Asociada	RSSI, TDoA, ToA	RSSI, ToA, TDoA, RTof	AoA	RSSI	RSSI, ToA	Señales inerciales	Imágenes
Ecuaciones geométricas o algebraicas	Sí	Sí	Sí	No	Sí	No	No
Complejidad de cálculos	Media	Media	Media	Baja	Media	Baja	Baja
Hardware adicional	No	No	Sí	No	No	Sí	Sí

Al analizar la Tabla 2.2, se descartan las técnicas de *Vision Analysis* y *Dead Reckoning*, ya que la primera de ellas requiere fijar una o varias cámaras para cubrir el área de interés y tomar imágenes en tiempo real, necesita mayor capacidad computacional si se desea hacer un sistema de localización que permita el estudio de varios objetivos en constante movimiento dentro del escenario de pruebas. Por su parte, *Dead Reckoning* necesita integrar acelerómetros y giroscopio a los dispositivos para determinar la velocidad con la que se mueve el objetivo. Los errores de estimación son acumulativos porque las nuevas posiciones de los objetivos se calculan únicamente a partir de posiciones y velocidades anteriores [43], [85].

Al igual que *Vision Analysis* y *Dead Reckoning*, la técnica de triangulación requiere de hardware adicional para su aplicación lo cual aumenta los costos de implementación,

² Para *fingerprinting* es necesario de al menos 1 nodo de referencia porque se debe almacenar su información en una base de datos en la fase *offline* para luego ser comparada con las medidas de la señal del objetivo en la fase *online* [22].

³ En *Dead Reckoning* se calcula una posición relativa del objetivo a partir de la información de posición inicial y la información de orientación inicial de por lo menos un nodo fijo [9].

además, al ser AoA la métrica utilizada con esta técnica no se considera viable para el desarrollo del trabajo de grado.

La trilateración y la multilateración son bastante parecidas, no requieren de hardware adicional y tienen la capacidad de emplear la métrica de RSSI, sin embargo, la multilateración al tener más puntos de referencia hace que la estimación de la localización del objetivo es más exacta, disminuyendo un poco las ambigüedades que se presentan en la trilateración.

La técnica de proximidad no puede proporcionar estimaciones de la posición relativa o absoluta de los objetivos como lo hacen las demás técnicas, si bien es la técnica más fácil de implementar sus resultados no son exactos y los errores aumentan cuando el escenario es más amplio, por esta razón no se considera para la implementación en el trabajo de grado. El *fingerprinting* es de las técnicas más utilizada en los sistemas de localización en interiores basados en radiofrecuencia porque, en la mayoría de los casos, tiene una alta exactitud en las localizaciones estimadas, además, la complejidad de los cálculos es baja y no requiere de hardware adicional que aumenten los costos [43], [51].

Teniendo en cuenta lo anterior, las técnicas de multilateración y *fingerprinting* son las que más se ajustan al desarrollo del trabajo de grado. La combinación de estas técnicas puede reducir errores en la estimación de la localización y permite realizar el análisis de la exactitud al emplear la tecnología RFID.

2.2.2 Frecuencia de trabajo

Como se mencionó en la sección 1.3.2, existen diferentes rangos de frecuencia en los que esta tecnología puede operar. Por este motivo es necesario seleccionar un rango de frecuencias que permita cumplir con los requerimientos del trabajo de grado, ya que la frecuencia de operación puede afectar la distancia máxima de lectura de una etiqueta.

Para seleccionar el rango de frecuencias se analizan las propiedades, las ventajas y desventajas de cada una de estas, como se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Análisis de la frecuencia de trabajo de un sistema RFID [22], [50].

Propiedades	LF	HF	UHF	Microondas
Rango de frecuencia	120-134 kHz	13,56 MHz	860-960 MHz	2,45-5,8 GHz
Alcance	<30 cm	30-90 cm	2-5 m	12-30 m
Costos	Alto	Alto	Bajo para etiquetas pasivas y alto para etiquetas activas	Alto
Tipo de acoplamiento	Inductivo	Inductivo	Capacitivo	Capacitivo

entre el lector y la etiqueta				
Ventajas	La comunicación no es afectada por presencia de agua o metales dentro del escenario.	Identificar múltiples objetos en distancias cortas. Resistente a interferencias eléctricas.	Lectura múltiple de etiquetas a alta velocidad y a grandes distancias. Las etiquetas pueden ser de diferentes tamaños y formas, además de tener un bajo costo. Esta frecuencia posee una buena penetración en materiales no conductores	Lectura de etiquetas rápida, simultánea y a distancias mucho más grandes que permiten aumentar el tamaño del escenario de pruebas. Capacidad de penetrar materiales no conductivos.
Desventajas	Capacidad limitada para leer múltiples etiquetas de manera simultánea. Altamente afectada por colisiones e interferencias.	No funciona bien cuando existen materiales metálicos en la zona de lectura, ya que éstos producen reflexiones en la señal.	La lectura de las etiquetas es afectada por la presencia de líquidos y metales en el ambiente.	Número limitado de dispositivos basados en esta banda. Sensible a ciertos materiales como el agua o los metales debido a la absorción y a la reflexión.

Considerando la Tabla 2.3, cuanto mayor sea la frecuencia, mayor es capacidad de lectura simultánea de las etiquetas. Si se trabaja con acoplamiento inductivo, como es el caso de LF y HF, la zona de cobertura es un área pequeña porque la transferencia de energía solo puede ocurrir a estrecha proximidad, por lo tanto, las etiquetas solo pueden leerse a corta distancia, además la intensidad del campo magnético disminuye al aumentar la distancia entre el transmisor y el receptor. Por otro lado, los costos de implementación de estas dos frecuencias y de la frecuencia de microondas son elevados comparados con UHF, debido a los componentes utilizados en la fabricación de los dispositivos [86].

UHF es la más utilizada en los sistemas RFID por el tipo de acoplamiento que permite alcanzar distancias más grandes y por la gran variedad de dispositivos disponibles en el mercado comparados con las demás frecuencias.

Considerando lo anterior, la banda de frecuencias a utilizar para el desarrollo del trabajo de grado es UHF. Al trabajar en este rango de frecuencias es necesario tener en cuenta el EPC, específicamente el *EPCglobal UHF Class 1 Generation 2*, al ser este el estándar que regula el rango de frecuencias UHF [41].

2.2.3 Diseño propuesto

Teniendo en cuenta la métrica y las dos técnicas seleccionadas, el escenario de localización para el despliegue del prototipo es un espacio cerrado y de un área reducida. El escenario seleccionado se muestra en la parte derecha de la Figura 2.2 donde se definieron una serie de coordenadas (X, Y) , en este espacio se ubican cuatro nodos fijos, que corresponden a las antenas del lector, en cada una de las esquinas del área de interés con el fin de brindar la mayor cobertura posible y cumplir con la separación de por lo menos 3 m entre las mismas para evitar interferencias; las coordenadas fijas de los nodos son $(0,0)$ para el nodo 1 (A1), $(8,0)$ al nodo 2 (A2), $(0,8)$ a nodo 3 (A3) y $(6,5)$ el nodo 4 (A4). Los puntos de referencia se determinan dentro del escenario según las coordenadas establecidas, considerando el espacio, se establece una distancia de 0,5 m entre cada punto de referencia, obteniendo así un total de 74 puntos de referencia. Además, en la parte izquierda de la Figura 2.2 se indica las medidas en metros del escenario de pruebas.

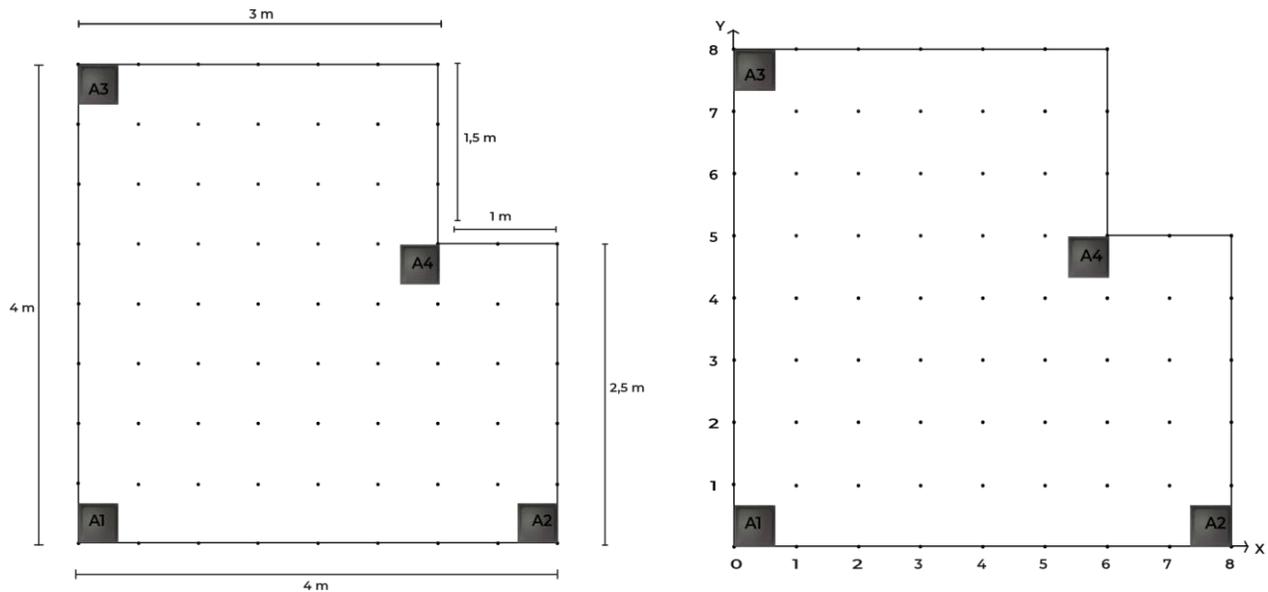


Figura 2.2. Medidas del escenario de pruebas (izquierda) y distribución de las coordenadas del escenario de pruebas (derecha).

Para el diseño rápido, se realiza el esquema modular presentado en la Figura 2.3.



Figura 2.3. Esquema modular del prototipo.

A. Módulo de transmisión de datos (MTD)

- **Fase *Offline*:** se establecen las ubicaciones de los distintos puntos de referencia o muestras dentro del escenario de implementación, y se leen los niveles de RSSI para cada uno de estos.
- **Fase *Online*:** tanto las etiquetas como el lector intercambian información en forma de señales RF siguiendo unos determinados protocolos especificados en el estándar *EPCglobal UHF Class 1 Generation 2*.

B. Módulo de recepción y envío de datos (MRED)

Este módulo es el encargado de recibir las señales de las etiquetas y los datos de todos los puntos de referencia para luego enviar los valores de RSSI al sistema de control o computador.

- **Fase *Offline*:** durante esta fase *offline* o de entrenamiento se genera una base de datos con las coordenadas e información del RSSI que corresponden a cada uno de los puntos de referencia.
- **Fase *Online*:** se recolecta la información de las etiquetas objetivo y se envía al sistema de control, para ser almacenados y procesados.

C. Módulo de procesamiento de datos y obtención de resultados (MPR)

- **Fase *Offline*:** se capturan nuevamente los valores de RSSI de los puntos de referencia, con el objetivo de ajustar y actualizar la base de datos para tener mejores resultados ya que se pueden presentar diferentes cambios en el escenario.
- **Fase *Online*:** luego de recibir toda la información, el sistema de control o el recurso computacional se encarga de ejecutar los distintos algoritmos para estimar la localización de las etiquetas objetivo, teniendo en cuenta la métrica y

las técnicas seleccionadas para encontrar los valores más cercanos al actual y estimar la localización.

La Figura 2.4 representa el diagrama de flujo para el algoritmo de funcionamiento del diseño propuesto, donde se combinan las dos técnicas seleccionadas *fingerprinting* y multilateración. Se establecen dos fases, la primera fase *offline*, se compone de definir las coordenadas de los puntos de referencia, con esto se limita el perímetro del escenario de pruebas del prototipo. Luego, es necesario obtener el valor RSSI de la etiqueta posicionada en cada punto de referencia, estos valores son percibidos por cada uno de los nodos dentro del escenario de pruebas con el objetivo de crear una base de datos que contenga las coordenadas y los valores RSSI.

La implementación de una base de datos es indispensable para tener acceso a esta información en la etapa siguiente, la cual es la fase *online*, donde se debe iniciar con una captura de datos dentro del escenario, luego se ejecuta la multilateración, pero se crea una ambigüedad dado a la similitud entre algunos puntos, por lo tanto se debe implementar otra etapa dentro de esta segunda fase, la cual es la ejecución del filtro K-NN para estimar una coordenada y mejorar la exactitud. Al tener etapas que implican distintas técnicas es necesario realizar un ajuste antes de presentar la localización estimada de la etiqueta, ya que algunos resultados pueden dar por fuera del escenario de pruebas.

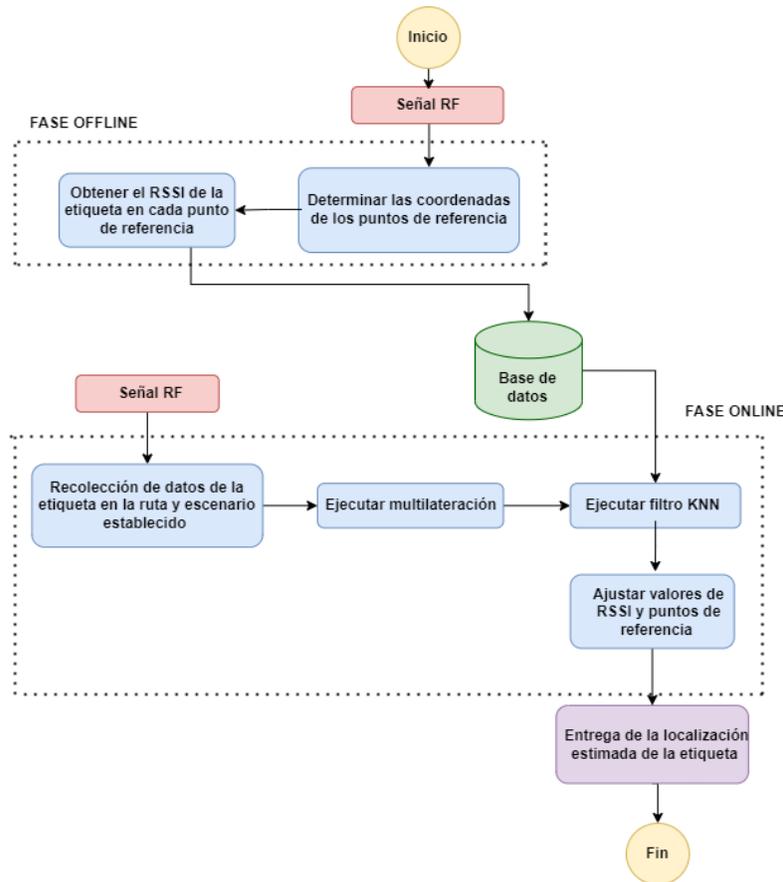


Figura 2.4. Diagrama de flujo general del prototipo de localización en interiores.

En la Figura 2.5 se muestra el funcionamiento que se espera obtener al combinar las técnicas, la métrica y el filtro seleccionado dentro del escenario de pruebas. Luego de conocer los k vecinos más cercanos se selecciona el más adecuado por medio de la moda, al tener dos posibles localizaciones, una generada por la multilateración y otra generada por la aplicación del filtro se realiza el promedio, determinando así una localización estimada más cercana al valor real estudiado que corresponde al cuadrado de color azul.

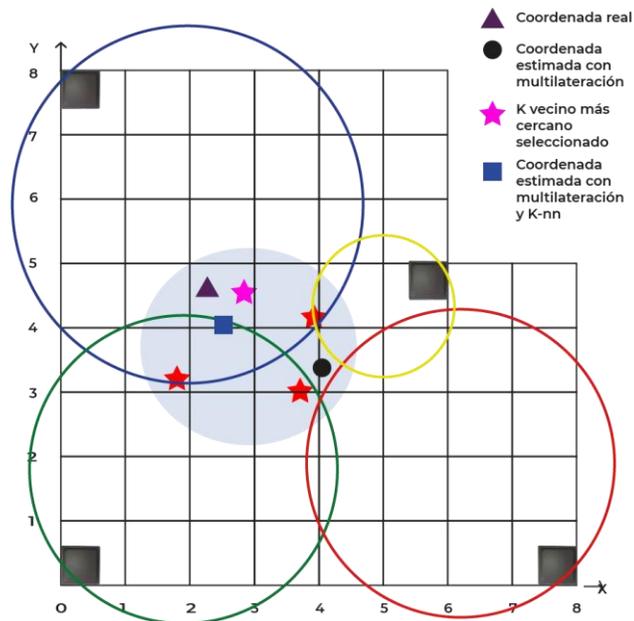


Figura 2.5. Multilateración y filtro K-NN

Durante la fase *online* del MPR se ejecutan diferentes procesos, el primero de ellos es la multilateración. La Figura 2.6 representa el diagrama de flujo para la ejecución de la multilateración, en el cual se realiza la recolección de datos del escenario de pruebas, más específicamente del valor RSSI, y por medio del sistema de ecuaciones dado en (1.4) calcular la distancia entre cada uno de los nodos fijos y la etiqueta presente, con el objetivo de obtener una coordenada estimada a partir de la solución de este sistema de ecuaciones, sin embargo, es necesario un criterio de decisión, el cual es verificar que la coordenada resultante de la etapa de multilateración está dentro del escenario de pruebas porque de no ser así, se debe repetir la toma de datos, pero cabe aclarar que la toma de datos se debe realizar en el mismo intervalo de tiempo para cada uno de los nodos fijos. Por último, teniendo una coordenada estimada válida se grafica para compararla con el valor real del punto estudiado y conocer la exactitud de la técnica.

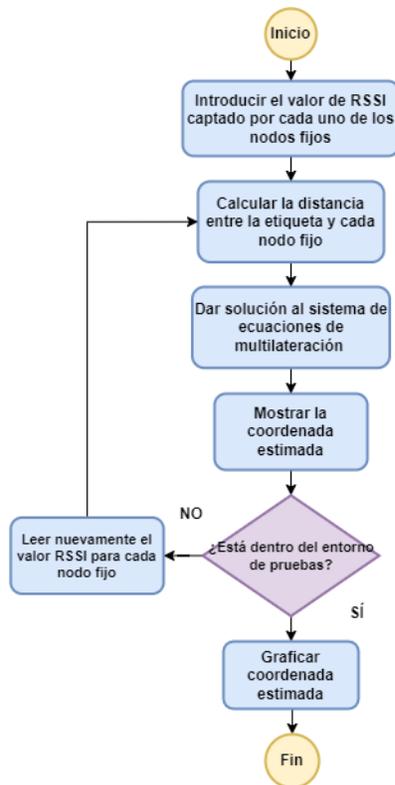


Figura 2.6. Diagrama de flujo de Multilateración.

En la Figura 2.7 se muestra los 4 círculos generados a partir de las ecuaciones de multilateración empleadas, estos círculos están centrados en los nodos para encontrar la intersección o área donde posiblemente se encuentra el. Además, como se muestra en la Figura 2.7 el valor estimado está distante de la coordenada real, es por esto que es necesario emplear un filtro para obtener una localización con una exactitud mayor.

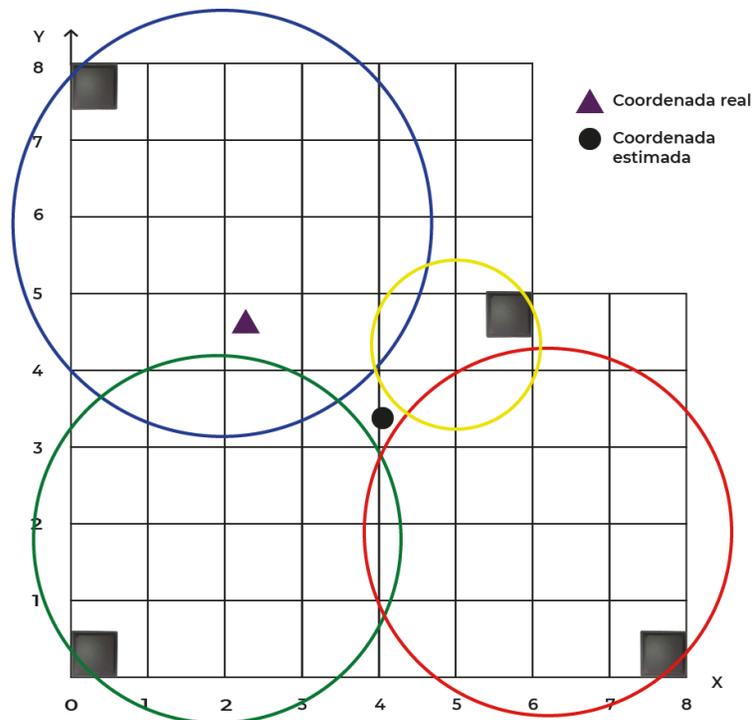


Figura 2.7. Multilateración.

Existen varios filtros que se pueden utilizar para disminuir las ambigüedades generadas por la multilateración pues, al ser una técnica que depende directamente de las distancias, los diferentes fenómenos como la multitrayectoria y la reflexión afectan el cálculo de dichas distancias y por lo tanto se disminuye la exactitud. El filtro K-NN es una elección típica en los IPS que no requieren de un procesamiento de datos demandable, de complejidad en los cálculos y de alta complejidad computacional, además aumenta la exactitud en la estimación de la localización del objetivo [99], [100].

El diagrama de flujo para este filtro se ilustra en la Figura 2.8, el cual inicia con determinar un vector RSSI con la dimensión de datos a recolectar, es decir, se crea un vector que se compone del número de puntos de estudio, ya que al momento de ingresar los valores leídos por cada una de las antenas o nodos fijos el prototipo debe ser capaz de reconocer si dicha lectura es permitida o si es necesario realizar un ajuste al mismo, esto se debe a que existen factores que influyen directamente en el valor de RSSI, tales como temperatura, pérdidas de propagación, difracción, entre otros. Una vez ingresado al algoritmo los valores percibidos por cada uno de los nodos fijos se presentan las 4 posibles coordenadas más cercanas al valor real para así establecer un ponderado entre ellas y estimar la localización del objeto.

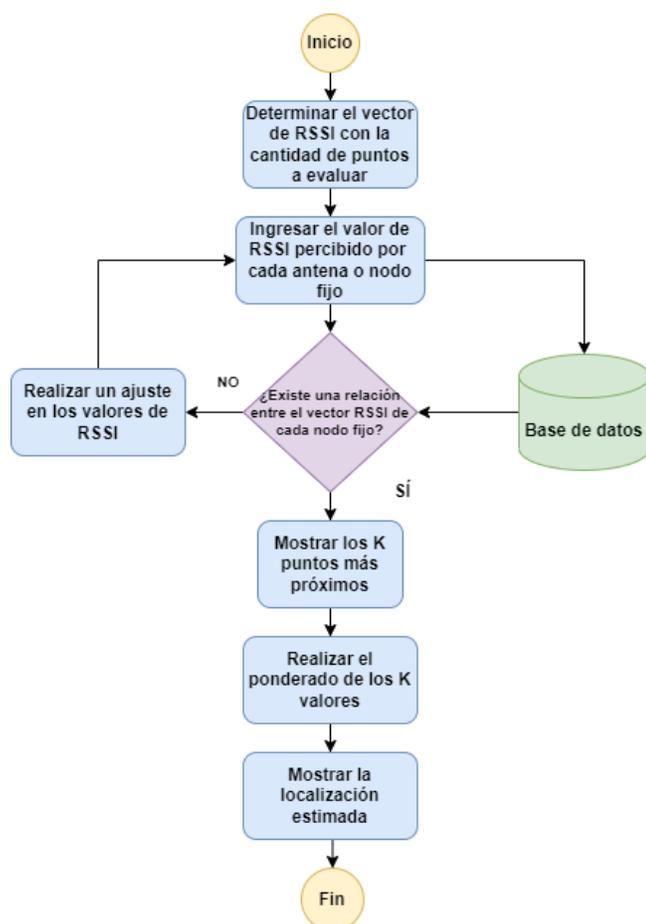


Figura 2.8. Diagrama de flujo del filtro K-NN.

Como se observa en la Figura 2.9, a partir de la lectura de RSSI del objetivo por los cuatro nodos fijos, se consultan los valores de RSSI en la base de datos tomados en una fase *offline* para seleccionar los $k = 4$ vecinos más cercanos y de esta manera se escoge el valor de RSSI más cercano al valor actual leído.

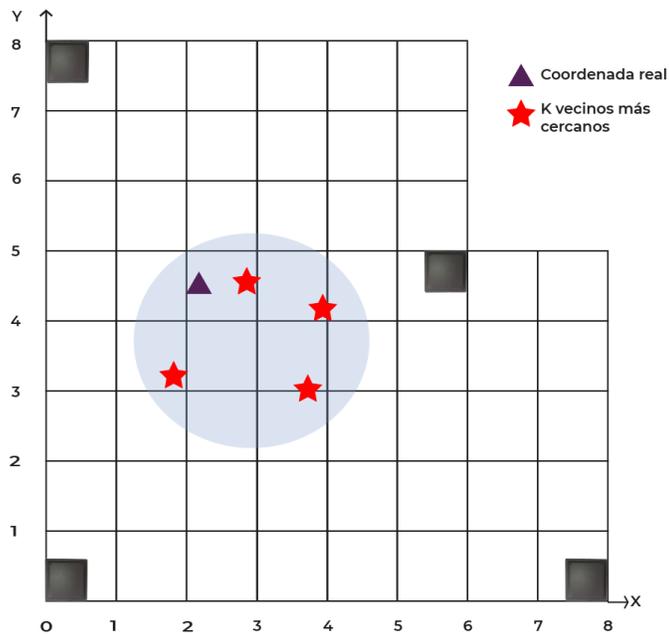


Figura 2.9. Filtro K-NN

2.2.4 Selección de dispositivos

2.2.4.1 Lector

Estos dispositivos varían en forma, tamaño y potencia, además pueden ser móviles o fijos. El lector contiene interfaces de comunicación estándar para la transferencia de información con el sistema de control o computador y procesamiento, incorpora dichas interfaces a través de un enlace: RS232, RS485, Ethernet, WLAN, RF, Bluetooth o Wi-Fi [28]. Para este trabajo se escogió el lector fijo RU420B, el cual permite una comunicación bidireccional entre el lector y las etiquetas. El lector es desarrollado por la compañía SYSIOT bajo el protocolo ISO18000-6C, el cual permite leer y escribir los códigos de identificación y datos de la memoria de múltiples etiquetas de manera simultánea. Como se muestra en la Figura 2.10, el lector proporciona cuatro puertos MCX para la conexión de las cuatro antenas o nodos fijos, admite USB, un puerto de red RJ-45, un puerto serie RS-232 o RS-485 y 4 Entradas/Salidas de Propósito General (GPIO, *General Purpose Input/Output*) [87].



Figura 2.10. Lector RU420B [87].

Las especificaciones generales del dispositivo se observan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Especificaciones [87].

Lector RFID RU420B	
Protocolo	EPC global UHF Class 1 Gen 2 / ISO 18000-6C
Tasa de baudios	115200 bps
Modulación	ASK, PR-ASK
Rango de frecuencia	840-960 MHz
Potencia de salida RF	0-30dBm (pasos de 1dB)
Modo de trabajo	Frecuencia fija o salto de frecuencia
Velocidad de lectura	≥100 pcs/s

2.2.4.2 Antena

La antena permite la comunicación entre el lector y las etiquetas durante el proceso de localización. Las antenas que se encuentran en el mercado cuentan con múltiples formas, tamaños, patrón de radiación, ganancia, polarización, entre otros parámetros que se deben considerar para la selección de la antena correcta.

Además, se debe considerar las orientaciones de las etiquetas porque no siempre tienen una dirección determinada, al utilizar una antena con polarización circular las etiquetas no deben estar orientadas en la misma dirección del campo que irradia la antena; como se muestra en la Figura 2.11, la onda cambia de dirección en sentido horario o antihorario de forma rotativa [88].

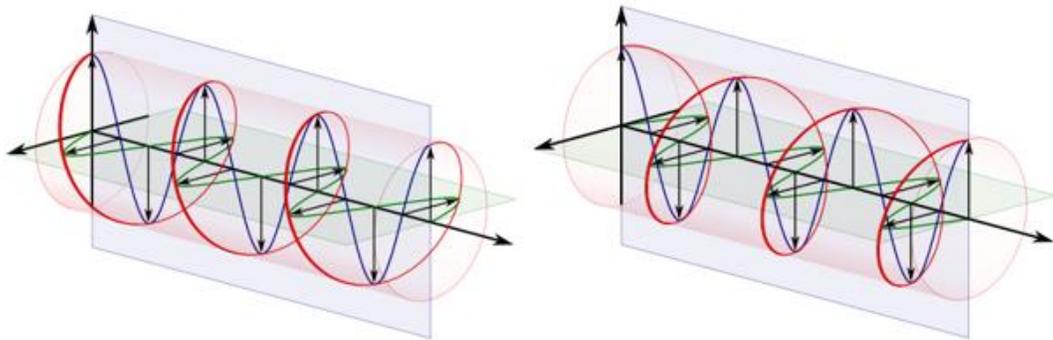


Figura 2.11. Polarización circular sentido antihorario y horario [89].

La antena XCAF-12L, que se aprecia en la Figura 2.12, es compatible con el lector seleccionado. Producida por Invengo para operar en escenarios interiores y satisfacer las necesidades de un sistema RFID.



Figura 2.12. Antena XCAF-12L [90].

En la Tabla 2.5 se encuentran las principales características y parámetros de la antena seleccionada.

Tabla 2.5. Especificaciones de la antena [91].

Antena XCAF-12L	
Dimensiones	294 x 294 x 64 mm
Peso	1.5 kg
Temperatura de Operación	-40 °C a 85 °C
Humedad	< 95%
Frecuencia de Operación	902-928 MHz
Frecuencia Central	915 MHz
Polarización	Circular
Ganancia	7.15 dBi
Impedancia	50 Ω
Conector	Tipo N
Ancho del Haz	70° (E) / 70° (H)

En la Figura 2.13 se muestra el patrón de radiación con polarización circular.

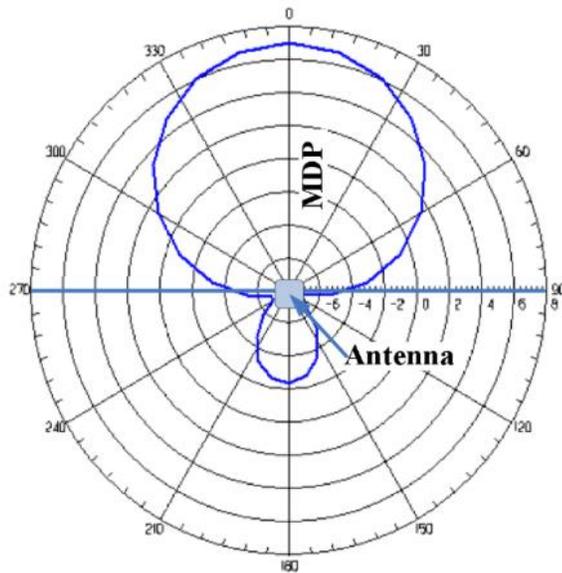


Figura 2.13. Patrón de radiación [92].

2.2.4.3 Etiquetas

Las etiquetas poseen varias características que se deben considerar, como: su tamaño, la capacidad de almacenamiento de datos, el tipo de alimentación y el rango de frecuencias, entre otras. Las etiquetas pasivas son ampliamente utilizadas en escenarios cerrados alcanzando distancias de hasta 9 metros, son de menor costo, tamaño reducido y cuentan con una vida útil mucho más larga que las etiquetas activas o semiactivas [28].

Las etiquetas elegidas para el sistema son EPC pasivas UHF *Class 1*, las cuales tienen memoria no volátil, un código único que las diferencia e identifica, una contraseña programable, comunicación usando una señal *backscatter*⁴, un código de detección de errores para el identificador único, el cual es el Código de Verificación de Redundancia Cíclica (CRC, *Cyclic Redundancy Check*) y una Memoria de la Etiqueta Identificadora (ITM, *Identifier Tag Memory*) donde se encuentran los datos [33].

La tabla 2.6 contiene las características de las etiquetas seleccionadas para el desarrollo del trabajo de grado. Según las características de los fabricantes, estas etiquetas tienen un diseño insensible a la orientación, lo cual permite a la antena del lector recibir sus datos con cualquier ángulo de orientación.

⁴ *Backscatter* o retrodispersión es un fenómeno físico en el cual las ondas que inciden en una etiqueta son reflejadas y emitidas de vuelta al lector, esto se produce en el acoplamiento capacitivo [32].

Tabla 2.6. Etiquetas seleccionadas.

Etiqueta	Marca/Referencia	Características
	Impinj Monza 3 AD-843	Frecuencia: 860-960MHz Protocolo: ISO/IEC 18000-6C y EPC Global Class 1 Gen 2 Memoria: 96 bits Tamaño: 95 x 38 mm [93].
	Impinj Monza 3 AD-833	Frecuencia: 860-960MHz Protocolo: ISO/IEC 18000-6C y EPC Global Class 1 Gen 2 Memoria: 96 bits Tamaño: 93.5 x 38 mm [94].
	ALIEN ALN-9740 Squiggle	Frecuencia: 840-960MHz Protocolo: ISO/IEC 18000-6C y EPC Global Class 1 Gen 2 Memoria: 128 bits Tamaño: 98.2 x 12.3 mm [95].

2.2.4.4 Estándares

Los equipos de Invengo cumplen con los estándares *EPCglobal UHF Class 1 Generation 2* o *EPC Gen2* y el *ISO/IEC 18000-6C*. La Tabla 2.7 presenta un resumen de las especificaciones para el sistema RFID bajo estos estándares.

Tabla 2.7. Especificaciones *ISO/IEC 18000-6C EPCGlobal Class 1 Generation 2* [29].

Parámetro	Tipo
Frecuencia	860-960 MHz
Codificación en el enlace directo	PIE
Tipo de modulación	ASK (DSB, SSB, PR)
EPC	96
Velocidad de transmisión de datos	80-640 Kbps
Codificación en el enlace inverso	FM0, <i>Miller coded subcarrier</i>
Modulación <i>backscattering</i>	ASK o PSK
Verificación	16 bits CRC
Protocolo anticollisión	Protocolo Q

Las colisiones se pueden presentar cuando varias etiquetas están en el rango de lectura del lector, generando problemas en el inicio de su respectiva transmisión, ocasionando que el lector no pueda interpretar todas las señales, produciendo retardos en el proceso de identificación. Para minimizar las colisiones, este estándar incorpora un protocolo anticollisión [6], [96].

2.3 Construcción del prototipo

La construcción del prototipo de localización en interiores se realiza de acuerdo con el análisis y la solución planteada en el diseño.

2.3.1 Hardware

A. MTD y MRED

El lector SR-RU420B se conecta al computador o sistema de control para el intercambio de información a través de un cable USB. Los cuatro puertos para los nodos del lector se conectan al terminal de carga 50Ω usando cuatro cables RF, los cuales tienen en uno de sus extremos un conector SMA y en el otro extremo un conector tipo N. La Figura 2.14 muestra los cuatro puertos cada uno con un cable RF, que se ensamblan en los puertos del SR-RU420B.



Figura 2.14. Conexión de los cuatro nodos con el lector.

B. MPR

La Figura 2.15 muestra la conexión del lector con el sistema de control o computador el cual se encarga del procesamiento de los datos. Para el envío de los datos desde el lector hacia el recurso computacional se requiere únicamente de un cable USB.

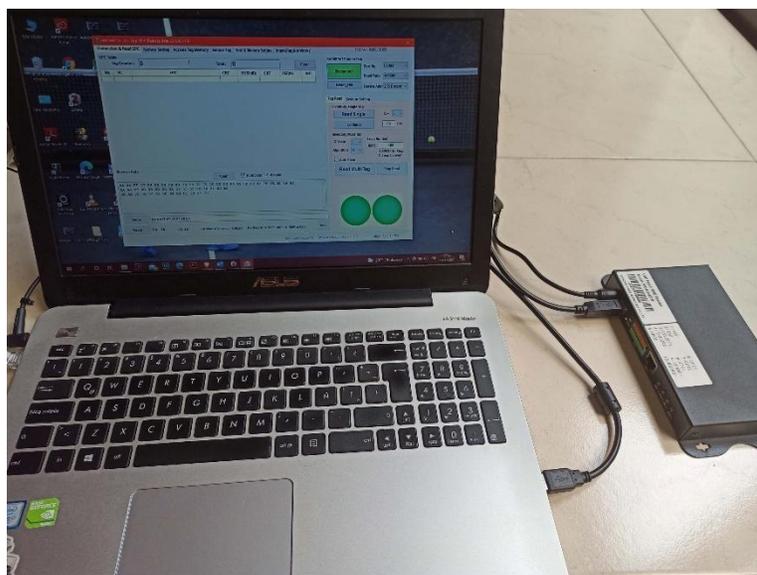


Figura 2.15. Conexión del recurso computacional y el lector SR-RU420B.

2.3.2 Software

A. MTD y MRED

Para la transmisión y recepción de los datos entre las antenas del lector y las etiquetas, el lector de SYSIOT cuenta con un *middleware* que permite la configuración y búsqueda de parámetros propios del lector, así como también la selección del modo de comunicación y frecuencias, la cantidad de antenas realizando las lecturas, la cantidad máxima de etiquetas a leer, la visualización de etiquetas y demás funcionalidades.

En la tabla 2.8 se observa la configuración de la frecuencia y potencia de trabajo para el lector y para cada antena. Además, el lector trabaja en *high sensitivity* para lecturas a largas distancias y en *auto polling* para lecturas simultáneas.

Tabla 2.8. Configuración del sistema.

Configuración	Valor
Frecuencia de trabajo	927.75 MHz(Channel 51)
Potencia de trabajo de los dispositivos	30 dBm

En la Figura 2.16 se muestra la información brindada por el módulo del lector luego de realizar la lectura de la etiqueta. El Protocolo de Control (PC, *Protocol Control*) define la longitud y la estructura de la memoria de la etiqueta. El código EPC es único para cada etiqueta, el demo admite la lectura y escritura de datos. El CRC define el valor de verificación para los datos de PC+EPC. El RSSI indica la intensidad de la señal de la etiqueta RFID recibida por el módulo lector, es un valor en dBm. Cuanto mayor sea el valor de RSSI, mayor será la intensidad de la señal. El CNT informa la cantidad de

lecturas por etiqueta. La Tasa de Error de Paquete (PER, *Packet Error Rate*) es el número de paquetes de datos recibidos erróneos dividido por el número total de paquetes recibidos. ANT es el puerto de la antena o nodo fijo por el cual se está realizando la lectura, siendo el 00 el nodo 1, el 01 el nodo 2, el 02 el nodo 3 y el 03 el nodo 4.

Hay dos opciones de trabajo que se pueden observar en la Figura 2.16, la lectura única de una etiqueta o múltiples lecturas simultáneas de etiquetas. El valor Q representa el número aproximado de etiquetas que pueden ser leídas, cuanto mayor sea el valor Q, mayor será el tiempo de lectura. El algoritmo indica la tasa de inventario de etiquetas y la tasa de lectura, siendo el algoritmo 2 de baja tasa de inventario de etiquetas y alta tasa de lectura de etiquetas.

The screenshot shows the software interface for the Impinj Monza 3 AD-833. At the top, there are tabs for 'Connection & Read EPC', 'System Setting', 'Access Tag Memory', 'Sensor Tag', 'Test & Modem Setting', and 'ImpinjTag(Not Work)'. The 'DLL Ver: 0x92.02.0B' is displayed in the top right corner.

The 'EPC Table' section shows a 'Tag Counter' of 196 and a 'Total' of 01. Below this is a table with the following data:

No.	PC	EPC	CRC	RSSI(dB)	CNT	PER(%)	ANT
01	30 00	AD 91 05 00 12 81 AD 56 22 00 00 AB	12 FA	-37	196	50,128	00

The 'SerialPort Connection' section includes a 'Disconnect' button, 'Port No.' set to COM3, 'Baud Rate' set to 115200, and 'Device Addr' set to 255 Broadc. There is also a 'Reset_FW' button.

The 'Tag Read' section has two sub-sections: 'Inventory Single Tag' and 'Inventory Mult-Tag'. In 'Inventory Single Tag', 'Read Single' is selected, 'Q' is set to 5, and 'Stop' is set to 60 ms. In 'Inventory Mult-Tag', 'Q Value' is 5, 'Algorithm' is 2, and 'Loop Number' is 188. There are 'Read Multi-Tag' and 'Stop Read' buttons.

The 'Receive Data' section shows a list of received data packets in hexadecimal format, with 'Clear', 'Autoclear', and 'Visible' checkboxes. Below this is a 'Send' button with the text 'AA AA FF 05 C8 00 3A 5E' and a 'Reset' button.

At the bottom, there are fields for 'RX: 209944', 'TX: 22171', 'Firmware Version: VS5.01', and 'Hardware Version: M092x 30dBm A5.0'. A 'test' button is also present.

The footer of the interface shows 'Module Reader Main Firmware Version: 93.02.01.19!' and '2021-06-28 04:54:03'.

Figura 2.16. Información de la lectura de la etiqueta Impinj Monza 3 AD-833.

B. MPR

Para la parte lógica de los algoritmos seleccionados, *fingerprinting*, multilateración y filtro K-NN, se hace uso de Matlab. Debido a los altos costos del Kit de Desarrollo de Software (SDK, *Software Development Kit*) la conexión entre el demo del lector y Matlab se realiza de forma manual.

El algoritmo implementado en Matlab se compone de dos etapas, la primera contiene el *fingerprinting*, en esta se establecen parámetros como los vectores de coordenadas

(X, Y) para establecer una base de datos con los puntos de referencia, de esta manera se genera una limitación del escenario de pruebas. Los puntos de referencia se correlacionan con los vectores que contienen los valores RSSI leídos por cada una de las antenas y se crea un mapa *fingerprint* por cada antena y por cada etiqueta; en la segunda etapa se ejecuta la multilateración, donde es necesario establecer cuál es el índice de propagación, además, se necesita conocer el valor de RSSI que retorna la etiqueta desplegada en el escenario para cada uno de los nodos, esta información se extrae del software controlador del lector. Se creó una función en Matlab para establecer cuál es la distancia entre la etiqueta y los nodos fijos y por medio de matrices se soluciona el sistema de ecuaciones (1.4) para obtener la coordenada estimada. Como estos valores están sumamente alejados de los puntos de referencia, se hace imprescindible la implementación de la tercera etapa del algoritmo, esta consiste en la implementación de un filtro K-NN, el cual basándose en el RSSI captado por cada una de las antenas y haciendo uso de los mapas elaborados en la primera etapa, se delimita el área de convergencia de los círculos para posteriormente mostrar los 4 vectores más cercanos para obtener las coordenadas estimadas de cada uno de los objetivos.

En la Figura 2.17 se observa la sección de la casa dispuesta para el escenario de pruebas, esta área se despeja completamente para disponer los cuatro nodos de referencia en el espacio.



Figura 2.17. Escenario real de pruebas

2.4 Configuración inicial

En esta parte se realiza una configuración inicial de los dispositivos con el fin de seleccionar una adecuada potencia de trabajo, asimismo, se realizan varias pruebas tomando gran cantidad de datos para encontrar las constantes de referencia RSSI y n descritas en la sección 1.5.1.

2.4.1 Potencia de trabajo

Para escoger la potencia de trabajo del lector se ubican la antena y la etiqueta uno frente al otro para variar tanto la potencia como la distancia, se comenzó con una potencia de 20 dBm hasta llegar a 30 dBm. Como se observa en la Figura 2.18, cada una de las etiquetas seleccionadas se colocan a una altura de 1,10 m frente a la antena que se sitúa a una distancia de 1,50 m.

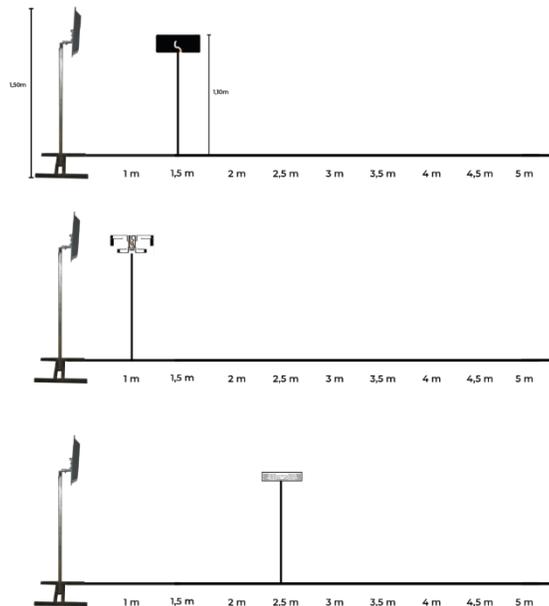


Figura 2.18. Escenario para la selección de la potencia de trabajo.

Al realizar todas las variaciones de potencia y distancia se observó que con 30 dBm el alcance es mucho mayor, por lo tanto, se considera que esta potencia es adecuada para garantizar lecturas exitosas de las etiquetas. Además, al concluir las pruebas se analiza que los materiales metálicos, el cuerpo humano o portar la etiqueta dentro del bolsillo o bolso, la comunicación con el lector es débil y ocurren errores de lectura para todas las variaciones de potencia, siendo en 30 dBm el escenario que presenta menor fluctuación.

2.4.2 Ajuste del valor de referencia RSSI y del índice de pérdidas de propagación n

En esta fase de pruebas se colocan las etiquetas *AD-843*, *AD-833* y *ALN-9740 Squiggle* a 1 m de la antena para obtener el valor de referencia RSSI. Por cada etiqueta se toman 100 muestras que fueron promediadas. En la Tabla 2.9 se muestran los valores correspondientes al promedio de los 100 datos obtenidos por cada etiqueta.

Tabla 2.9. Promedio de valores obtenidos por cada etiqueta.

Etiqueta	AD-833 (A)	AD-843 (B)	ALN-9740 Squiggle (C)
Valor RSSI (dBm) referencia (A)	- 35,6	- 42,02	- 41

El valor típico teórico de n para los espacios interiores está entre 2 y 4 [97], pero este parámetro se debe ajustar al escenario seleccionado para el desarrollo del prototipo. Como se muestra en la Figura 2.19, cada etiqueta se coloca frente a la antena y se varia la distancia cada 0,25 m, iniciando en 1 m hasta llegar a 5,75 m, por cada variación de la distancia se toman 100 muestras de los valores RSSI arrojados por el software del lector. Al promediar todos los datos por cada distancia, se concluye que las mediciones no presentan un comportamiento lineal, por esta razón, se grafican diferentes curvas que corresponden a valores del parámetro n para analizar el que mejor se ajusta al escenario de pruebas.

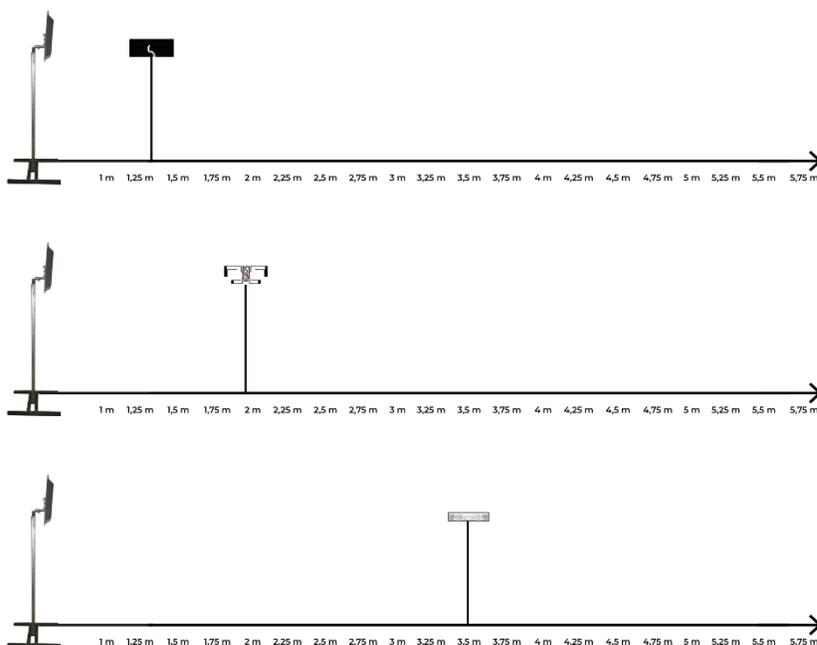
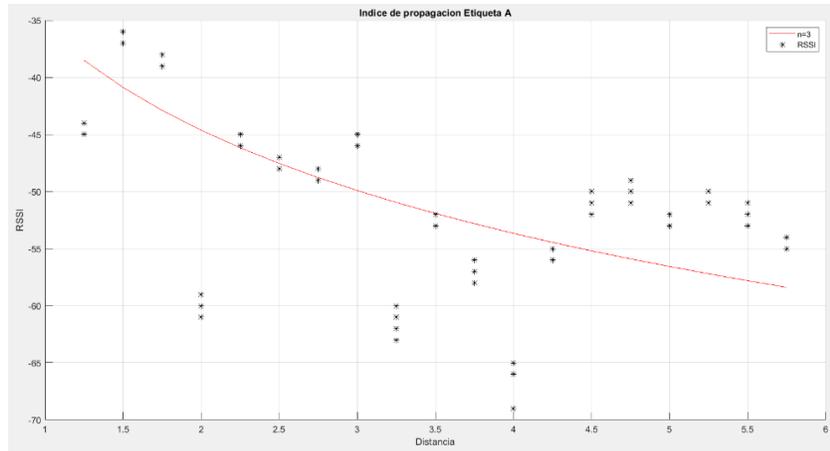
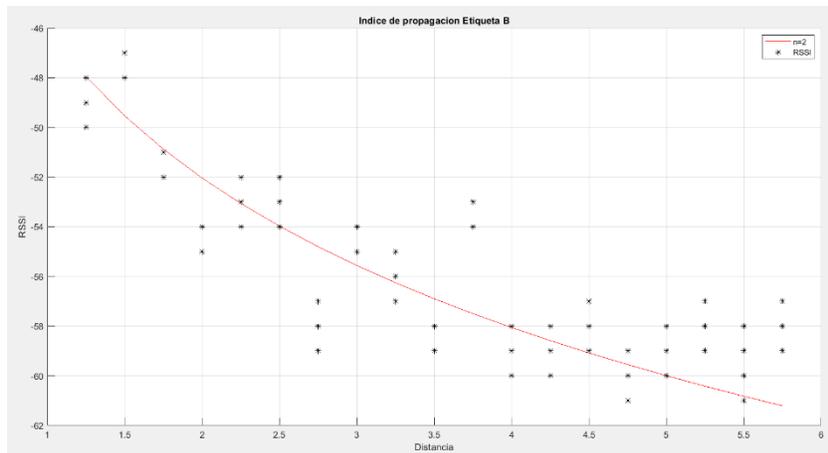


Figura 2.19. Escenario para encontrar los valores de RSSI por cada distancia.

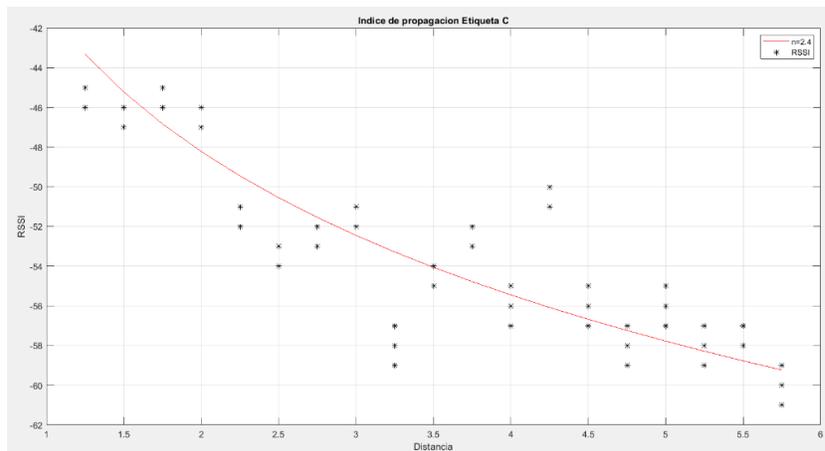
Al contar con tres etiquetas con diferentes características de fabricación es necesario establecer el valor de n para cada una al igual que el valor de referencia de RSSI. La Figura 2.20 muestra los valores del parámetro n seleccionados para cada antena, para estos se emplea la ecuación (1.6) y se inicia en $n = 2$ con variaciones de 0,2. En la Figura 2.20a se observa el valor de $n = 3$ seleccionado para la etiqueta AD-833 (A), el valor de n para la etiqueta AD-843 (B) se muestra en la Figura 2.20b el cual tiene un valor de $n = 2$ y en la Figura 2.20c se presenta el valor de $n = 2,4$ para la etiqueta ALN-9740 *Squiggle* (C).



a. Valor de n seleccionado para la etiqueta AD-833.



b. Valor de n seleccionado para la etiqueta AD-843.



c. Valor de n seleccionado para la etiqueta ALN-9740 *Squiggle*.

Figura 2.20. Índice de pérdidas de propagación para cada etiqueta.

Se seleccionan diferentes valores de referencia de RSSI y n por las características particulares de cada etiqueta, ya que cada una de estas presenta un comportamiento dentro del escenario de pruebas, además los valores de RSSI son completamente distintos por el acoplamiento capacitivo que existe entre el lector y cada una de ellas, por lo cual, no es posible emplear el mismo mapa de huellas para todas las etiquetas.

Luego de seleccionar estos valores de referencia se utilizan en las siguientes pruebas para ejecutar la técnica de multilateración.

2.4.3 Calibración del escenario de pruebas

Esta sección de calibración corresponde a la fase *Offline* de *fingerprinting* descrita en 1.4.2. Los nodos de referencia y las etiquetas se mantienen a la misma altura utilizada para las pruebas anteriormente descritas. Se realiza una recopilación de valores de RSSI para cada etiqueta creando el *dataset* de *fingerprinting*. Esta base de datos contiene el valor medido de cada RSSI con el respectivo valor de coordenada previamente establecida.

En cada punto se toman 100 muestras por cada etiqueta, se calcula el promedio de las muestras y se almacena en la base de datos junto con las coordenadas (x, y) de cada punto, además se tiene en cuenta la posición de los nodos, pues los valores RSSI varían según la distancia que exista desde la etiqueta a cada antena.

En las Figuras 2.21, 2.22 y 2.23 se presentan los mapas de *fingerprint* para cada una de las etiquetas. Se utilizó una escala de colores para diferenciar los valores de RSSI, siendo los más altos de color rojo y los más bajos de color verde. Se observa que cada etiqueta presenta un comportamiento diferente dado por sus características de fabricación.

La Figura 2.21 muestra que los valores de RSSI de la etiqueta A son mucho más altos en las regiones cercanas a cada antena, en los sectores donde los niveles de RSSI son menores, entre -56 a -66 dBm, es evidente que las orientaciones de los nodos y de la etiqueta afectan la lectura de los datos, además dificulta la estimación de la distancia entre el receptor y el transmisor.

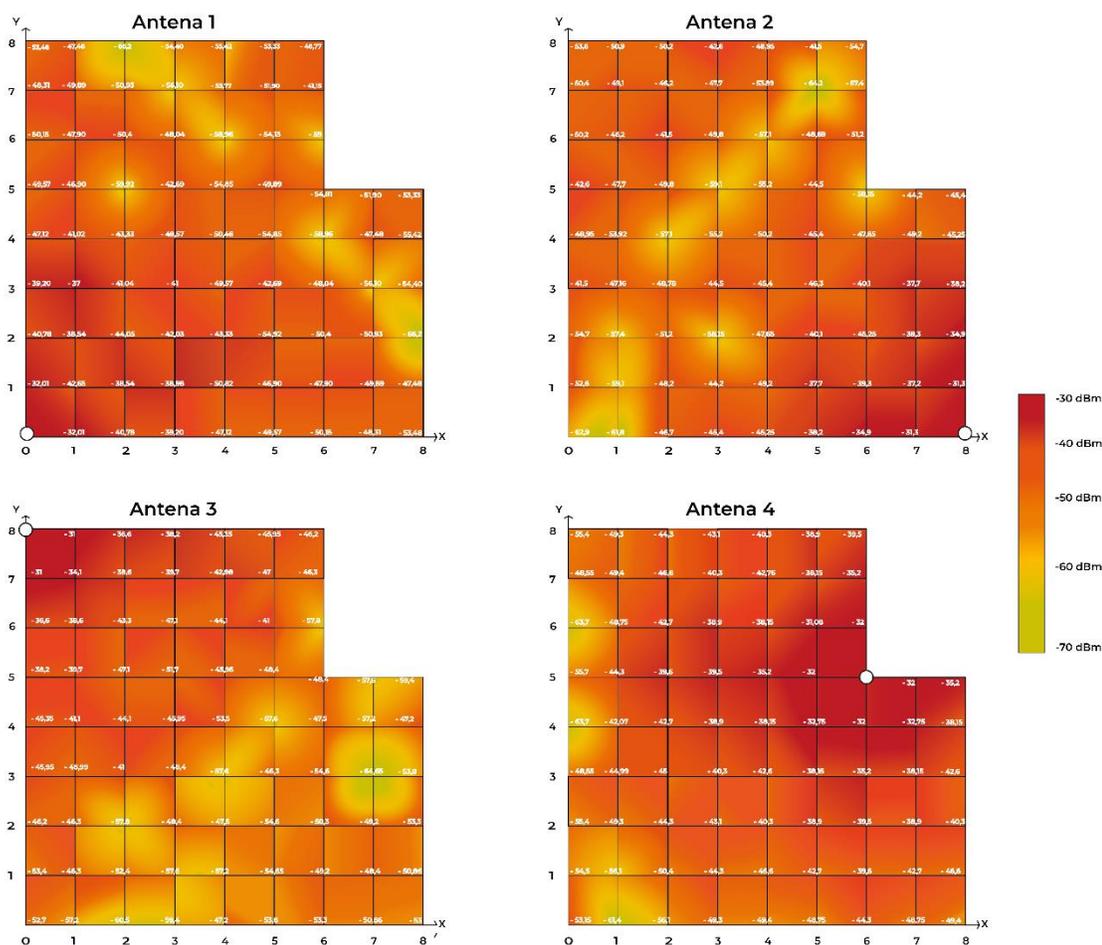


Figura 2.21. Mapa *fingerprint* para la etiqueta A.

Como se muestra en la Figura 2.22 la etiqueta B presenta niveles de RSSI muy bajos. Para la antena o nodo 1 y el nodo 2 la señal experimenta una mayor atenuación en los puntos más lejanos, esto se debe principalmente por el tamaño y el diseño de la antena de esta etiqueta. En estos puntos los valores varían entre -56 dBm y -64 dBm

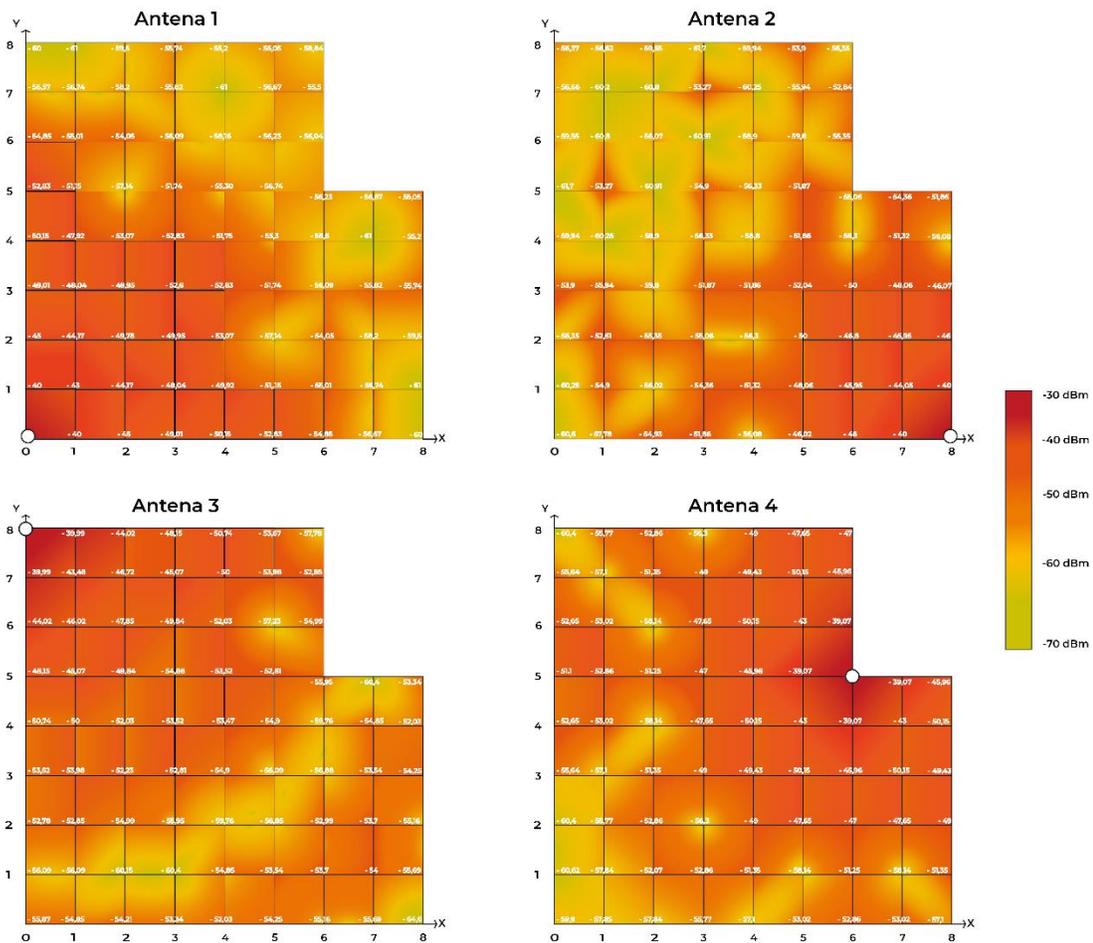


Figura 2.22. Mapa *fingerprint* para la etiqueta B.

El mapa para la etiqueta C se presenta en la Figura 2.23 donde, al igual que las demás etiquetas, los valores más altos de RSSI, entre -30 dBm y -40 dBm, se generan cerca de los nodos fijos. Esta etiqueta obtuvo un mejor comportamiento dentro del escenario junto con la etiqueta A, la dimensión de la antena de estas etiquetas es mayor comparada con la antena de la etiqueta B. Además, según las configuraciones de los fabricantes, las etiquetas A y C cuentan con un diseño de antena que puede transmitir y recibir datos casi en cualquier orientación, lo cual permite realizar lecturas casi en cualquier ángulo con la menor cantidad de puntos con lecturas muy variables de RSSI.

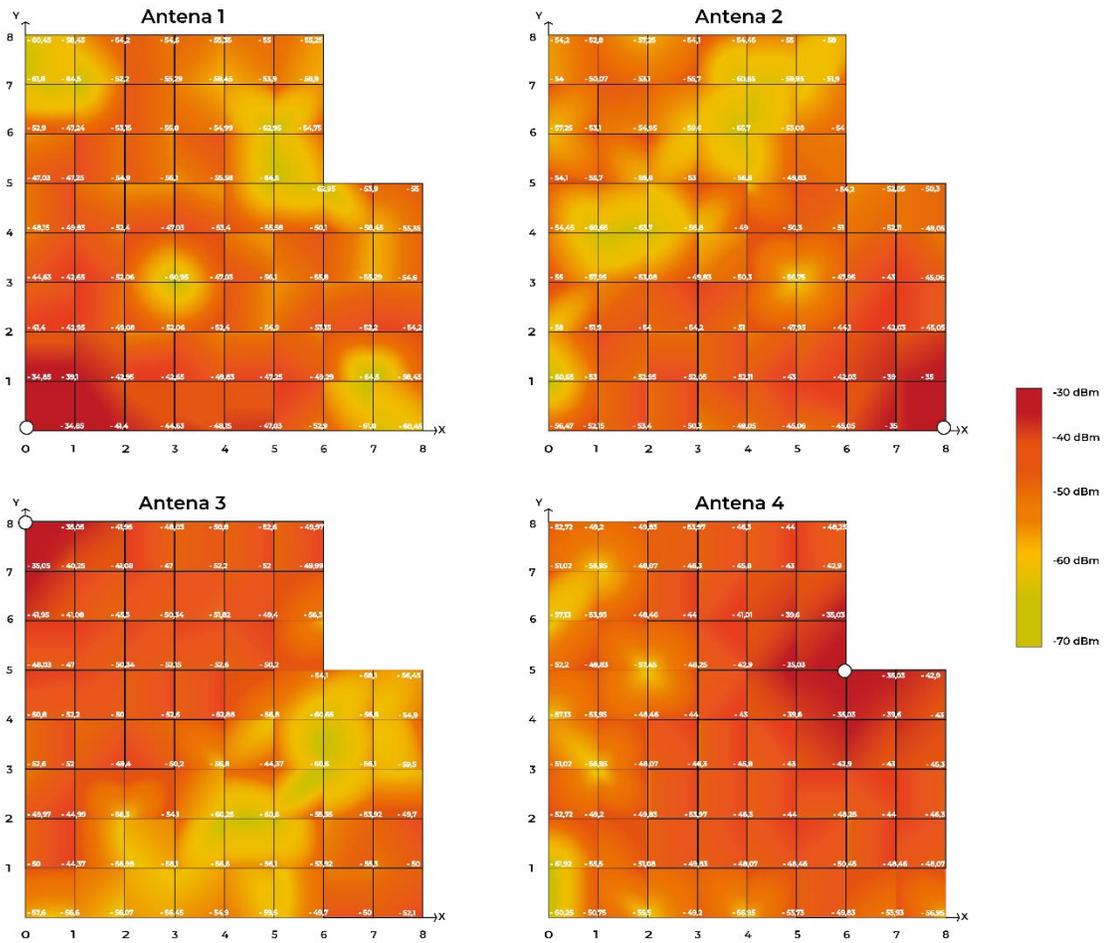


Figura 2.23. Mapa *fingerprint* para la etiqueta C.

Luego de completar la fase *Offline* se almacenan los datos de RSSI para cada etiqueta la cual es utilizada en la fase *Online*.

3. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Una vez realizadas las configuraciones iniciales del prototipo se procede a realizar las diferentes pruebas de funcionamiento dentro del escenario. A continuación, se describen dichas pruebas y los resultados obtenidos.

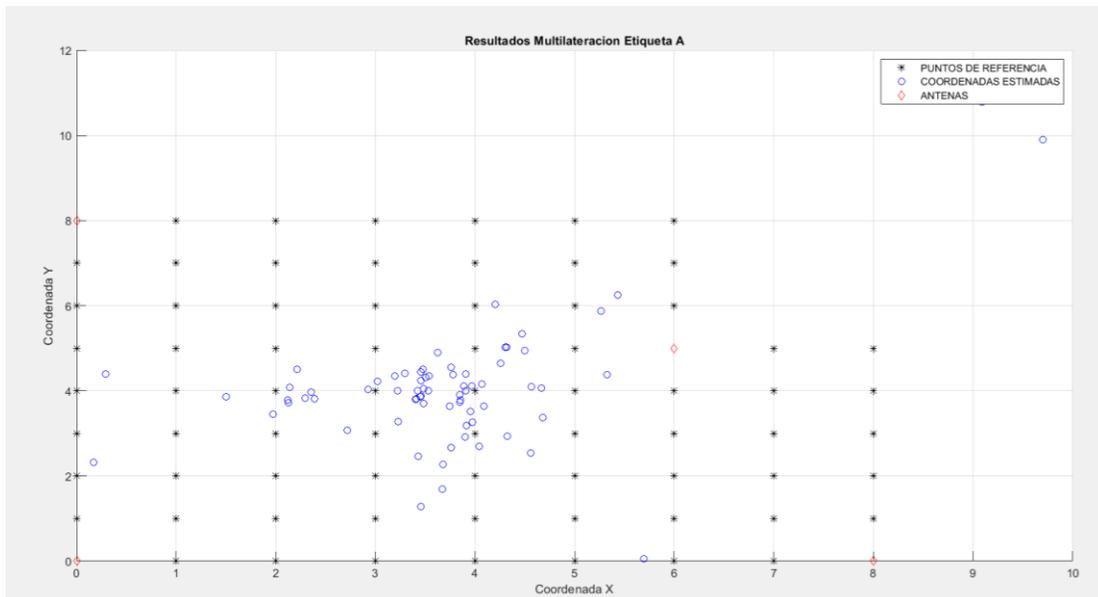
3.1 Pruebas de exactitud del prototipo empleando multilateración y K-NN

El propósito de esta prueba es evaluar la fase *Online* del *fingerprinting* para cada punto de referencia del escenario con las técnicas y filtro seleccionado. Para la etapa de multilateración se toman los valores de RSSI por cada punto de referencia y nodo fijo en el mismo intervalo de tiempo para no presentar variaciones. Si el valor de RSSI obtenido está muy distante de los márgenes de RSSI almacenados durante la fase *offline* es necesario tomar nuevamente estos valores para los cuatro nodos de referencia. Después de realizar dicha verificación, con el índice de propagación establecido para cada etiqueta se calculan las distancias que existen desde los nodos a la etiqueta a partir del modelo dado en (1.6) y de esta manera resolver el sistema de ecuaciones (1.4) para conocer las coordenadas estimadas de cada punto de referencia evaluado. Estos valores se verifican que estén dentro de los límites del escenario de pruebas, de lo contrario se debe realizar un ajuste repitiendo el proceso anterior. Finalmente se crea un vector con las coordenadas reales, el RSSI obtenido y las coordenadas estimadas para comparar los valores y así analizar la exactitud.

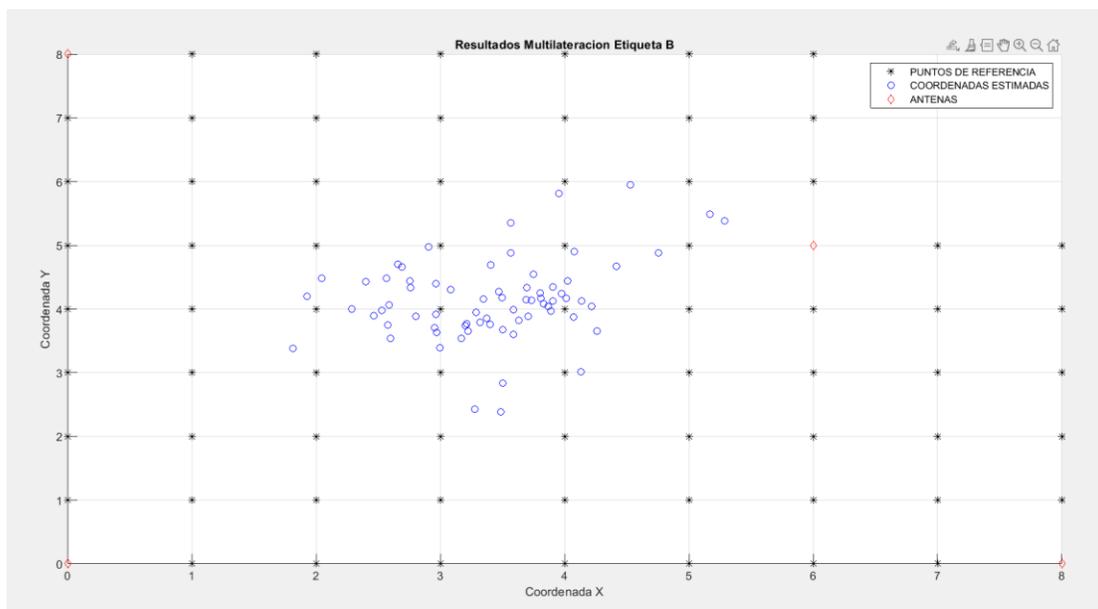
En la Figura 3.1a las posiciones de la etiqueta A son obtenidas a partir de la multilateración. El mejor resultado se presenta en la coordenada (3,4) donde el valor estimado por el algoritmo es (3,0202, 4,2275) con un error de 0,1142 m, este es un valor muy favorable considerando que los errores para la localización en interiores deben ser menores a 1 m [78], además, en la Figura 3.1a se observa que una coordenada estimada está fuera del escenario, esta se ajusta tomando nuevamente las lecturas de RSSI por cada nodo de referencia. En la figura 3.1b, el mejor resultado para la etiqueta B arroja un error de 0,146 m donde la posición obtenida de la etiqueta es (3,2868, 3,9484) y la coordenada real, es (3,4). Por otra parte, el valor del error más alto se presenta en la coordenada (8,1) siendo este de 2,579 m. Por último, en la figura 3.1c, se observan los resultados para la etiqueta C, siendo la coordenada estimada (3,9653, 4,0641) las más cercanas al valor real (4,4), lo cual genera un error de 0,036 m.

En los tres casos se observa que al emplear solo multilateración el sistema detecta que las etiquetas se encuentran solamente en el centro del escenario de pruebas. En los extremos los errores son mucho más elevados debido a la orientación de la etiqueta respecto al nodo, además por el patrón de radiación hay algunos puntos donde la señal es nula para alguna de los nodos. La mejor orientación siempre es aquella en la cual la etiqueta y el nodo están completamente paralelas, cuando no se presenta esto, hay

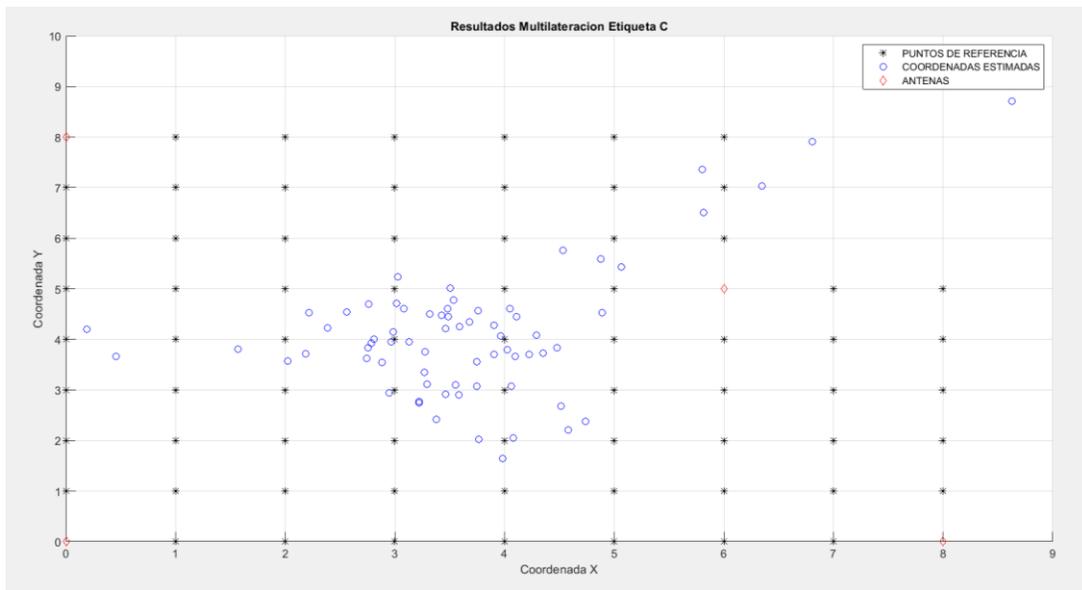
lecturas erróneas porque el RSSI capturado en ese momento no es igual al almacenado en la base de datos durante la fase *Offline* [98].



a. Resultados de multilateración para la etiqueta A.



b. Resultados de multilateración para la etiqueta B.



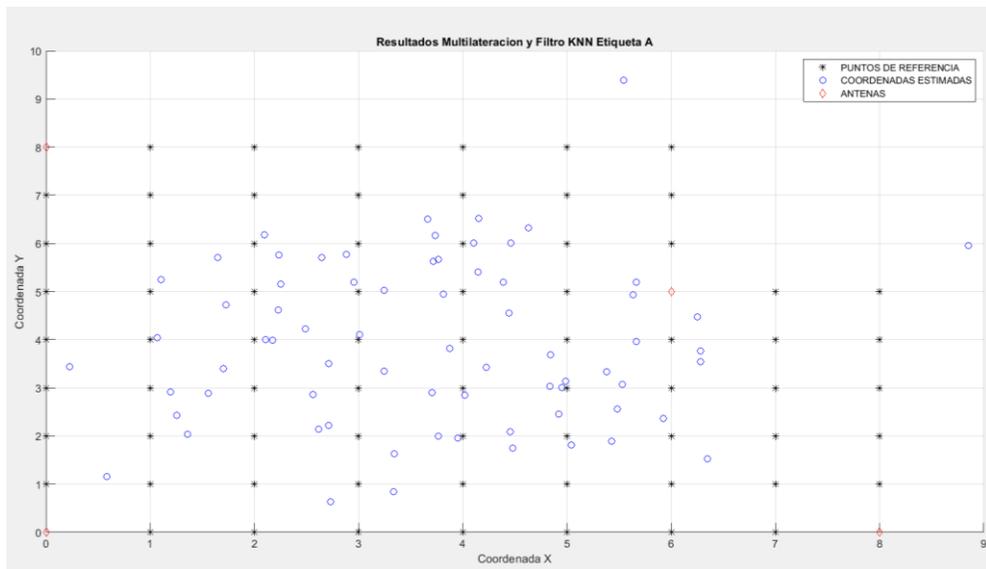
c. Resultados de multilateración para la etiqueta C.

Figura 3.1. Resultados de la multilateración.

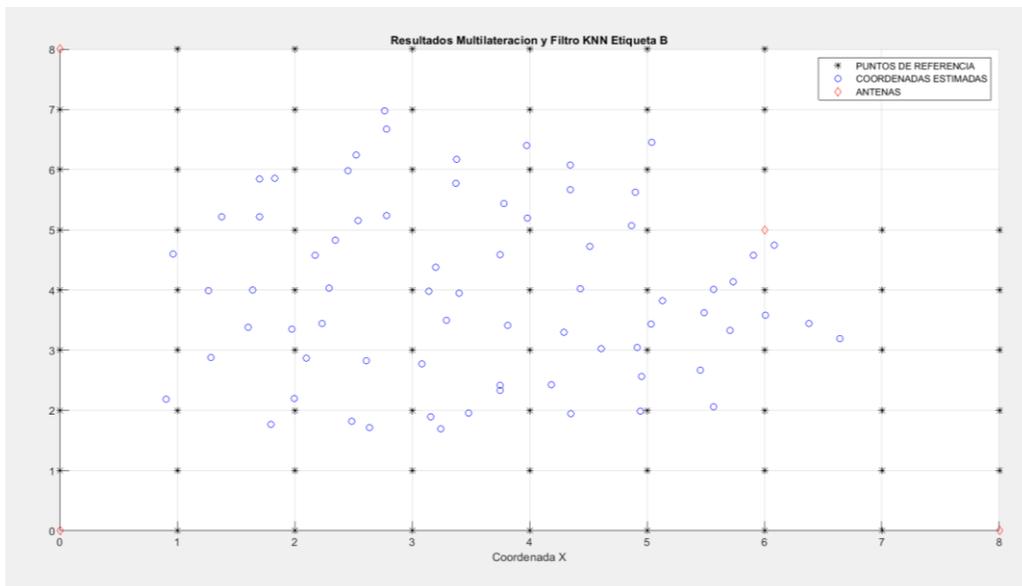
De manera general los resultados obtenidos no son satisfactorios, los errores de exactitud son muy elevados en la mayoría de los puntos evaluados. Se emplea el filtro K-NN el cual permite encontrar los valores más cercanos entre el RSSI actual y los almacenados durante la fase *Offline* mitigando los errores obtenidos al solo emplear multilateración.

De esta manera, la base de datos creada contiene las coordenadas de cada punto de referencia y el RSSI correspondiente por cada nodo fijo. Se comparan los valores de RSSI medidos en cada punto con los datos almacenados para conocer los k puntos más cercanos con base a la ecuación de distancia euclidiana dada en (1.2), para el prototipo propuesto k toma un valor de 4. Se calcula la moda de los cuatro valores obteniendo el punto más próximo, finalmente se promedian las coordenadas dadas en la fase de multilateración con las coordenadas generadas por la aplicación del algoritmo K-NN para estimar la localización actual de cada uno de los dispositivos.

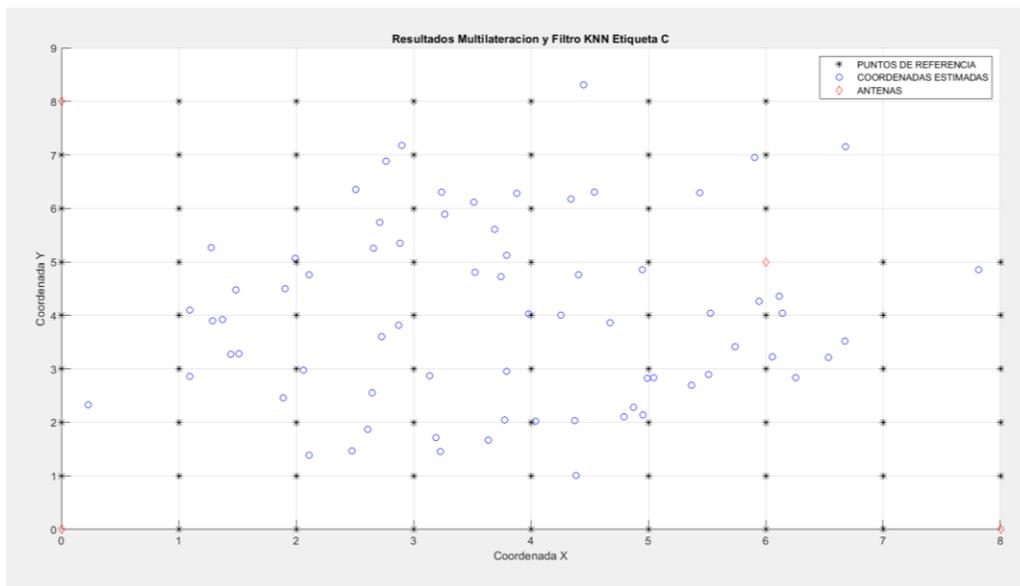
Los resultados de las tres etiquetas se presentan en la Figura 3.2 donde las posiciones ya no se encuentran tan concentradas en un solo espacio. En la Figura 3.2a se observa que los resultados de la etiqueta A ahora están más cercanos a las coordenadas reales siendo el 81,7% de los resultados con un error menor a 1m. Se disminuye el error más alto de estimación obtenido en la etapa de multilateración, pasando de un error de 4,044 m a 2,021 m. De igual manera, la Figura 3.2b presenta los resultados de la etiqueta B la cual obtiene el mismo porcentaje de valores con un error menor a 1m de la etiqueta A. el mejor caso durante esta fase de pruebas se observa en la Figura 3.2c la cual corresponde a la etiqueta C, esta obtiene el 84,5% de las coordenadas estimadas con errores menores a 1m



a. Resultados para la etiqueta A luego de ejecutar el filtro K-NN.



b. Resultados para la etiqueta B luego de ejecutar el filtro K-NN.



c. Resultados para la etiqueta C luego de ejecutar el filtro K-NN.

Figura 3.2. Resultados al ejecutar el filtro K-NN

Un inconveniente que se presenta al utilizar este tipo de filtro es la posibilidad de encontrar un conjunto de datos con alta coincidencia, pero que se encuentren dispersos, es decir, que las coordenadas se encuentren muy lejanas al valor real o presenten una gran diferencia con las demás seleccionadas, pero con unos valores muy cercanos de RSSI.

Durante estas pruebas, se observa que cuando las etiquetas están más cerca de los extremos del área o cuando se encuentran entre los puntos 7 y 8 del eje X, tienen un error de estimación mayor en comparación a las coordenadas estimadas en otros puntos del escenario. Además, las etiquetas tienen características de fábrica diferentes y cada una con un patrón de radiación, al colocar las etiquetas en diferentes orientaciones: de frente, de lado y de espaldas, las lecturas varían drásticamente, por lo cual la mejor opción es de frente al nodo.

Los resultados para estas pruebas realizadas se detallan en la tabla A.1, tabla A. 2 y tabla A. 3 del apéndice A, donde se presentan las coordenadas reales, las coordenadas estimadas luego de la combinación de la multilateración con el filtro K-NN y el error obtenido en las estimaciones para cada punto de prueba.

3.2 Pruebas de exactitud del prototipo con una persona portando las etiquetas dentro del escenario

El propósito de esta prueba es analizar la exactitud del prototipo de localización o el efecto de bloqueo temporal cuando una persona porta una etiqueta y camina dentro del escenario con las mismas características del escenario utilizado en las pruebas

anteriores. Como se muestra en la Figura 3.3, la persona realiza cinco recorridos dentro del área, tres de ellos a partir de unas rutas establecidas y los otros dos los recorre de manera arbitraria.



Figura 3.3. Persona dentro del escenario de pruebas.

En cada una de estas rutas se toman los valores de RSSI por cada una de las etiquetas y se emplea la misma lógica planteada anteriormente. A continuación, se explican cada uno de los recorridos realizados.

3.2.1 Recorrido por el escenario de pruebas a partir de las rutas fijas establecidas

Se seleccionan tres recorridos, el primero de ellos cuenta con 9 puntos o coordenadas, el segundo tiene un total de 10 coordenadas y el último 16 coordenadas como se observa en la Figura 3.4. Cada uno de estos puntos se marcan en el suelo del escenario de pruebas para que el usuario se pueda desplazar fácilmente. Al estar una persona portando las etiquetas dentro del área, los valores capturados de RSSI varían de manera constante, por esta razón se esperan unos milisegundos mientras el sistema se estabiliza para capturar los datos de RSSI por cada coordenada.

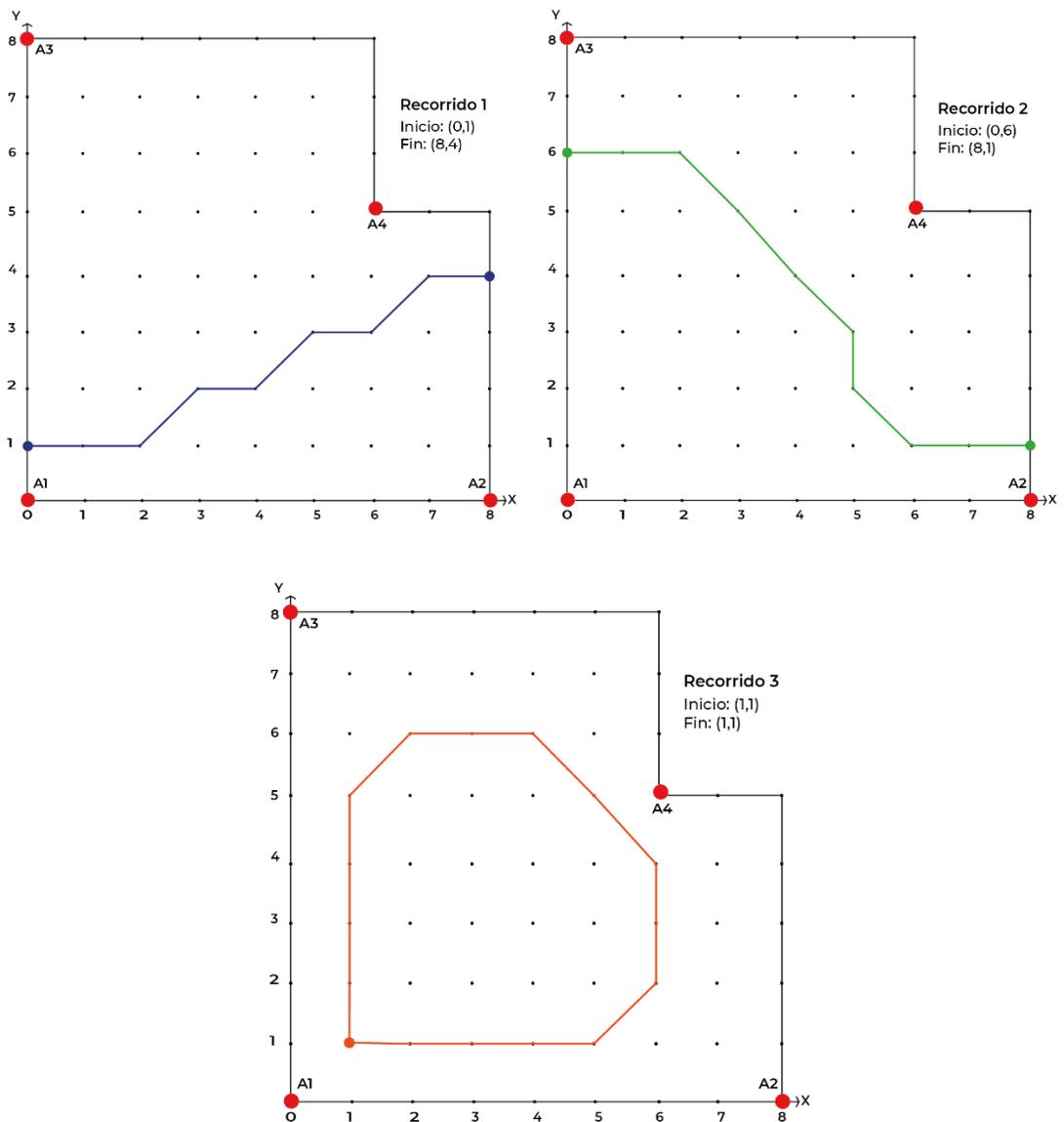


Figura 3.4. Rutas fijas establecidas dentro del escenario.

Los resultados más relevantes se observan en la Figura 3.5 donde los puntos de color azul son las coordenadas reales y los puntos de color rojo son las coordenadas estimadas luego de ejecutar los algoritmos establecidos. Al analizar todas las rutas con cada una de las etiquetas se concluye que la etiqueta C presenta mejores resultados en todos los casos, donde por lo menos solo dos coordenadas presentaron errores mayores a 1m, lo cual indica que se obtuvieron resultados satisfactorios. El peor de los casos en todas las rutas se encuentra en el recorrido 3 de la etiqueta B donde 6 de los 16 puntos evaluados presentan errores mayores a 1m. El punto menos exacto de este recorrido se encuentra en la coordenada (1,2) con un error de 1,3767 m, este error es elevado considerando el escenario de pruebas y la separación entre los puntos reales establecidos dentro del escenario.

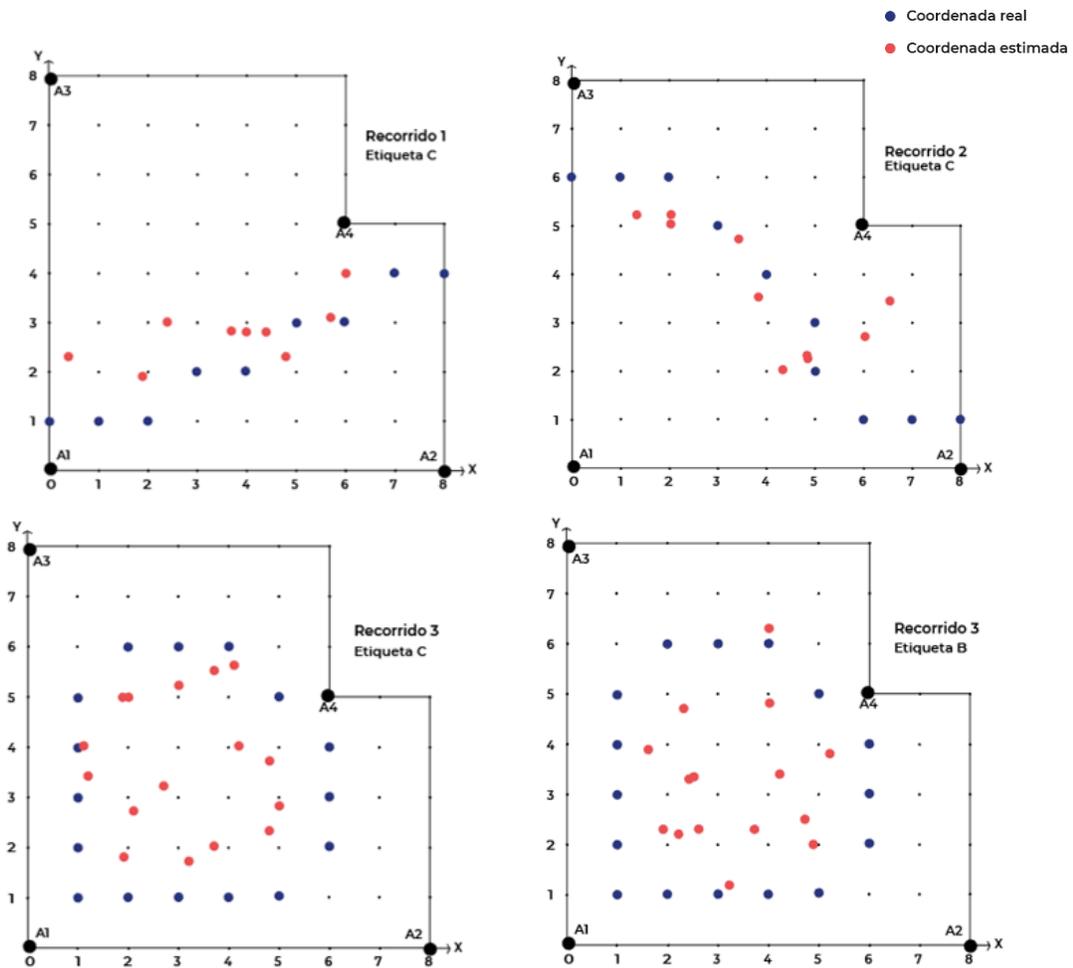


Figura 3.5. Resultados de los recorridos.

Los resultados detallados se muestran en las tablas B.1, B.2 y B.3 del apéndice B, el cual indica la coordenada real, el valor RSSI tomado en la prueba por cada nodo, los 4 valores del filtro K-NN por cada punto, las coordenadas estimadas y el error de exactitud. Como se ha explicado anteriormente, los obstáculos y los materiales de los objetos presentes en los escenarios cerrados afectan la propagación de la señal al igual que la orientación de las etiquetas respecto a las antenas del lector. Además, la presencia de un usuario y su constante movimiento dentro del escenario afecta las mediciones de RSSI. El cuerpo humano posee un 70% de agua, la cual tiene una frecuencia de resonancia de 2,4GHz, esta modifica la media de la señal alrededor de $\pm 1\text{dB}$ y en algunos casos en $\pm 5\text{dB}$, además, parte del valor de RSSI es absorbido por el cuerpo humano [101], [102], por tanto, se atenúa la señal e incluso el usuario puede llegar a bloquear completa o parcialmente la señal dificultando las lecturas, específicamente cuando el usuario está completamente de espaldas hacia alguna de los nodos, por esta razón, en algunos puntos evaluados los errores son mayores a 1m.

3.2.2 Recorrido libre por el escenario de pruebas

En esta última prueba el usuario se desplaza por el área de forma libre portando las etiquetas. La configuración de la potencia del lector, la frecuencia de trabajo y la altura de los nodos y de la etiqueta es la misma empleada en las pruebas anteriores.

Los resultados correspondientes al recorrido 4 se observan en la Figura 3.6, donde los puntos de color rojo son las coordenadas estimadas y los de color azul son los puntos o coordenadas reales por los cuales el usuario realizó cada uno de los recorridos. Con la etiqueta B el 41,66% de los puntos evaluados superan el error de 1 m y al igual que en las pruebas anteriores la etiqueta C presenta un mejor desempeño, donde 3 puntos de los 12 evaluados superan el error de 1 m, siendo el error más alto de 1,13m en la coordenada (8,2).

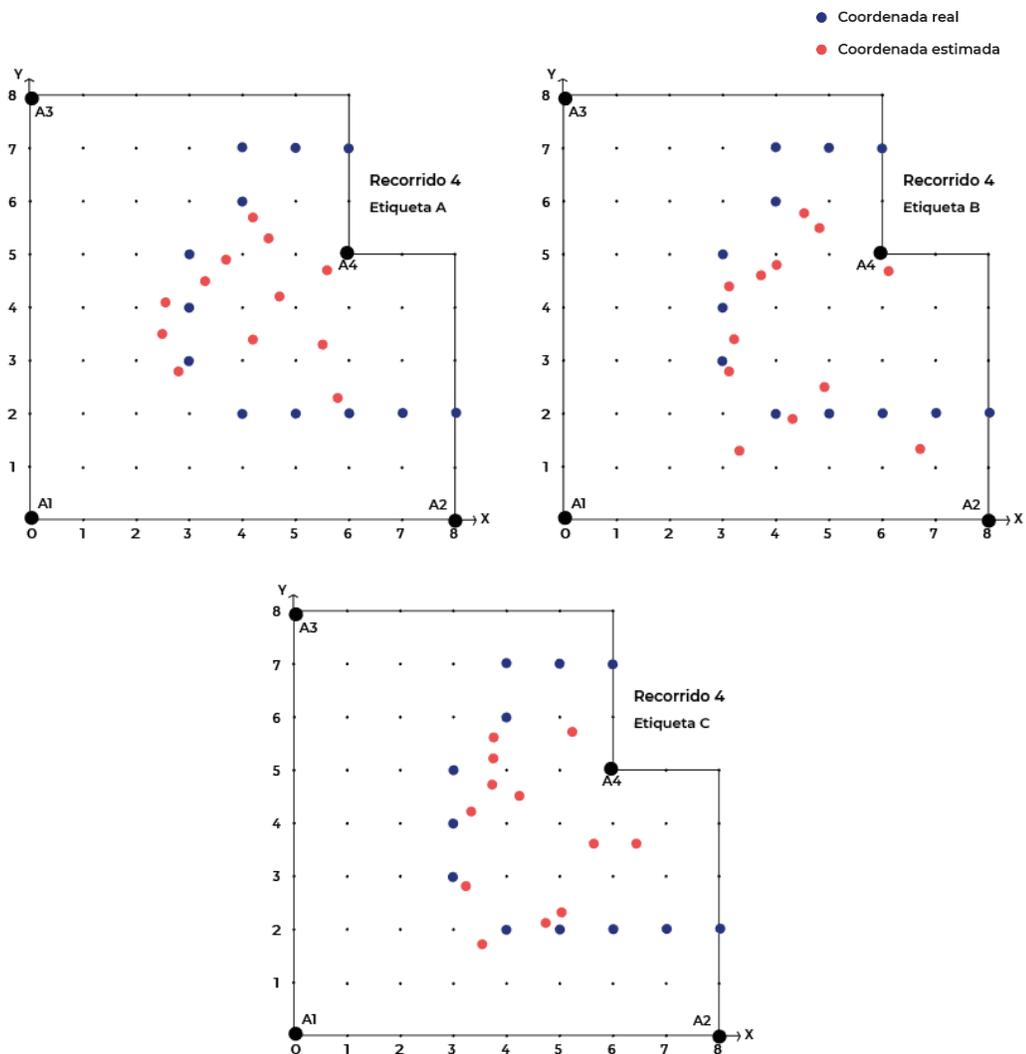


Figura 3.6. Resultados del recorrido 4.

Los resultados de la ruta 5 se observan en la Figura 3.7. Al analizar los resultados el peor de los casos para el recorrido 5 siempre se presenta en la coordenada (7,0)

siendo el error más elevado de 1,5143 m, esto se debe a que en este punto no todos los nodos captan el valor de RSSI, principalmente el nodo 3 dificultando la estimación de la localización, además la distancia entre el nodo 3 y esta coordenada es de 5,31m y las lecturas de RSSI cambiaban considerablemente razón por lo cual se realizaron varias mediciones en ese punto.

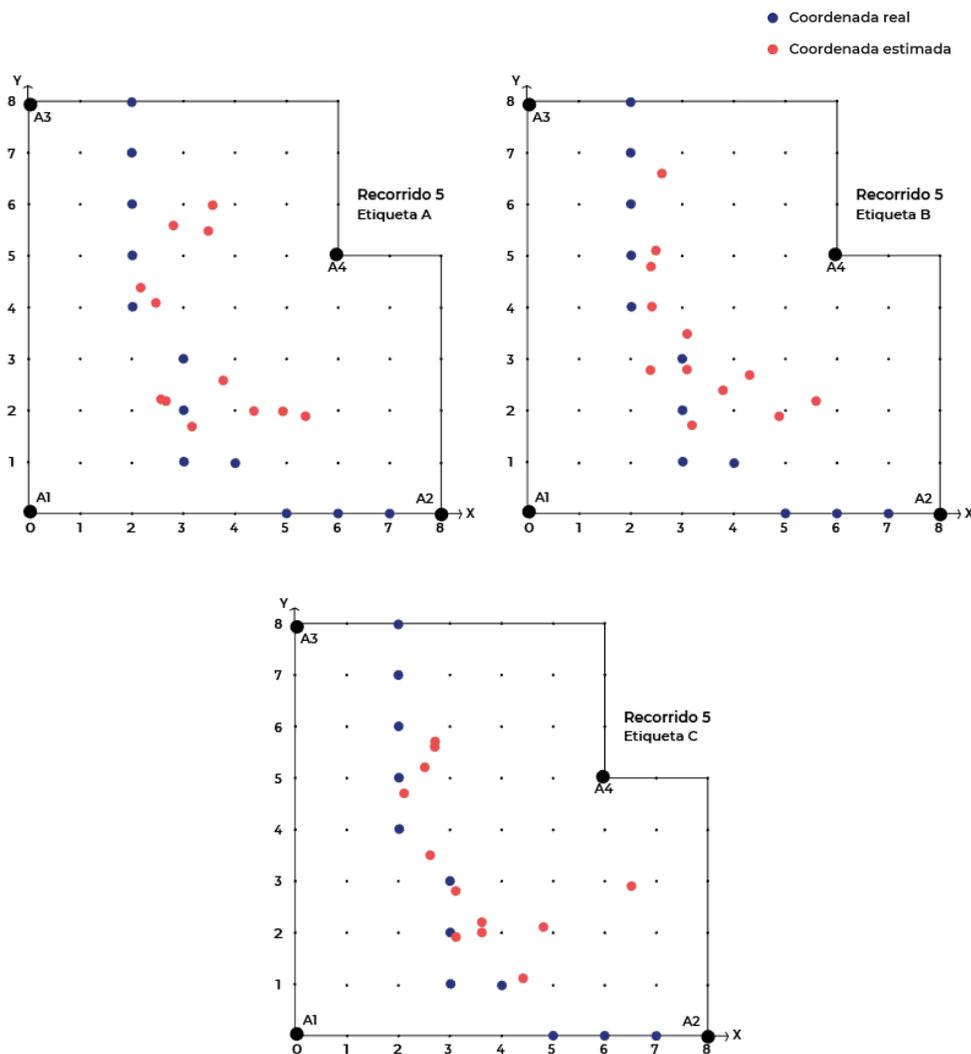


Figura 3.7. Resultados del recorrido 5.

Al emplear el RSSI se observa que en escenarios cerrados las condiciones de propagación son altamente cambiantes y al depender netamente de la distancia al usar multilateración, la localización de los objetivos es errónea, a pesar de que la implementación de multilateración no es tan compleja, el cálculo de las distancias no arroja buenos resultados. La técnica del *fingerprinting* al componerse de dos etapas permite conocer los puntos dentro del escenario de pruebas donde la señal es más débil, en cuáles los errores son mayores, cuál etiqueta es la que mejor trabaja en el escenario propuesto y en cuál nodo se obtiene una mejor cobertura debido a su

posición y al implementar el filtro K-NN en la fase *online* permite mejorar los resultados. Como se ha mencionado el valor de RSSI varía constantemente y en ocasiones arrojan valores aleatorios debido al movimiento del usuario que porta la etiqueta, es por esta razón que durante los procesos de toma de datos es fundamental la calibración constante de los mapas de *fingerprint* en la fase *offline* para minimizar los errores.

En la tabla 3.1 se muestra el resumen de los resultados obtenidos para esta prueba, se concluye que el promedio de error menor se obtiene en la etiqueta C para ambos trayectos, además el desplazamiento realizado por el usuario en el trayecto 5 presenta un promedio de error menor comparado con el trayecto 4 para las etiquetas A y B. Los resultados detallados para cada uno de los puntos se muestran en las tablas B.4, B.5 y B.6 del apéndice B.

Tabla 3.1. Promedio de error para los recorridos 4 y 5

Promedio de error	Etiqueta A	Etiqueta B	Etiqueta C
Recorrido 4	0,8513 m	0,8493 m	0,6091 m
Recorrido 5	0,8052 m	0,8148 m	0,6911 m

4. ANÁLISIS DE LA EXACTITUD

En este capítulo se realiza un análisis a mayor profundidad de las pruebas realizadas en el apartado anterior, utilizando la Función de Distribución Acumulada (CDF, *Cumulative Distribution Function*) para representar por medio de la variable x la diferencia que existe entre cada uno de los puntos de referencia con las coordenadas estimadas, producto de la ejecución de *fingerprinting*, multilateración y filtro K-NN. Con ello se establece el porcentaje de coordenadas prácticas obtenidas que no superan errores mayores a 1 m, teniendo en cuenta la diferencia entre los valores de las coordenadas reales con las coordenadas prácticas o estimadas. Lo anterior es llevado a cabo mediante el análisis de la CDF para cada prueba, donde la línea azul describe la probabilidad acumulada. De igual manera se sobrepone la línea puntuada que representa la posible tendencia del sistema si su comportamiento fuera predecible a partir de periodos consecutivos sin evidenciar otros factores.

4.1 Resultados de las pruebas de exactitud del prototipo empleando multilateración y K-NN

En la Figura 4.1 representa la CDF para cada una de las etiquetas en términos generales, es decir la diferencia que existe entre los puntos de referencia y las coordenadas estimadas con las técnicas y métricas seleccionadas, de esta forma se analiza la etiqueta con mejores valores de exactitud al momento de realizar las pruebas.

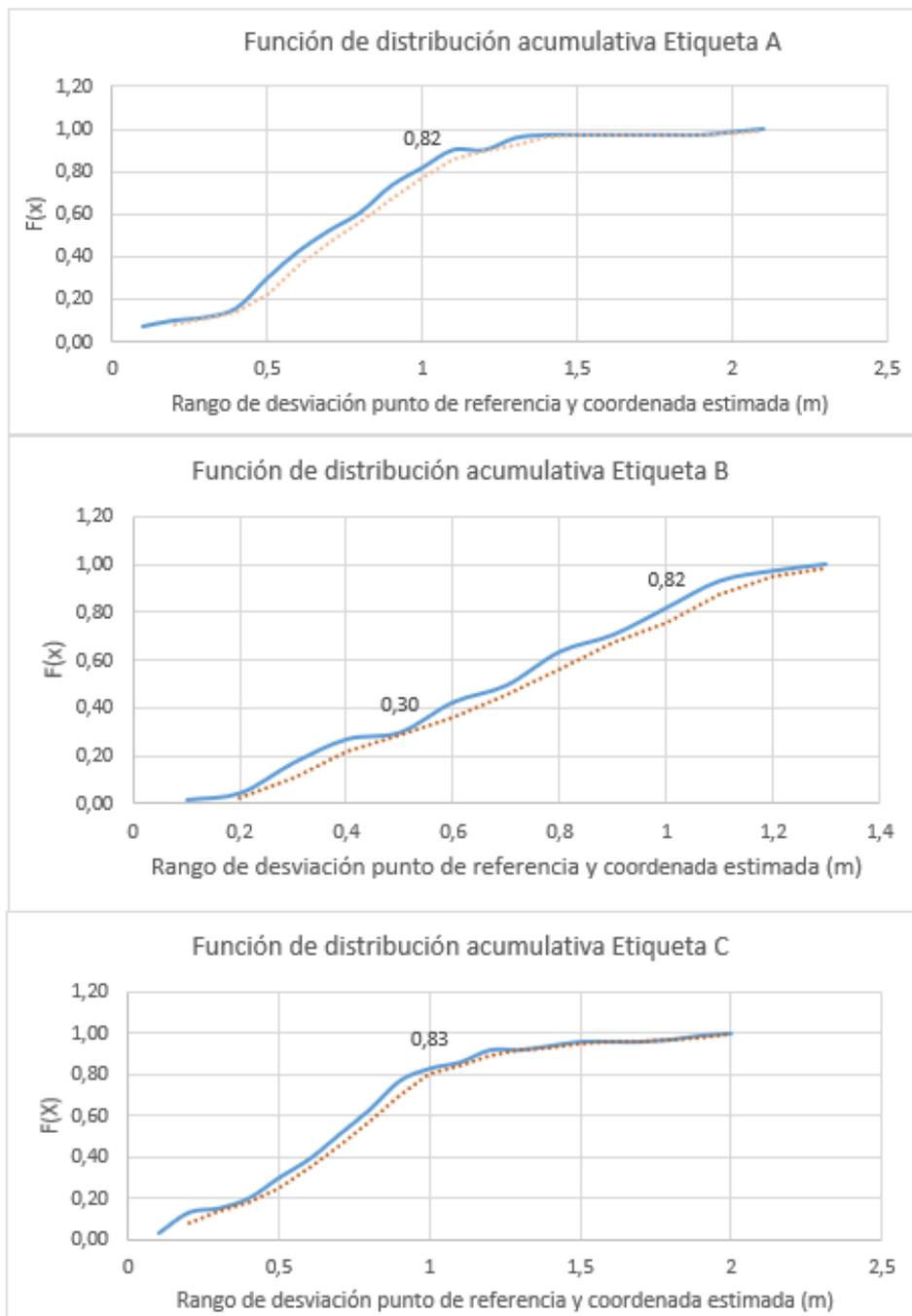


Figura 4.1. Gráficas de CDF.

La etiqueta C presenta el mejor porcentaje de exactitud con un valor de 83% y un crecimiento proporcional de la función desde el primer límite de 0,1 m, así mismo el comportamiento es similar a la tendencia lo cual indica que con dicha etiqueta es probable predecir un comportamiento del sistema en términos de rutas libres o una adaptabilidad del sistema. A diferencia de esta, la etiqueta A y B muestran un porcentaje de un 82%, la etiqueta A sigue un comportamiento más similar a la

tendencia comparado con la etiqueta B, su función tiene un crecimiento más acelerado a pesar de que inicia en un intervalo mayor de 0,4 m, dichas diferencias se originan al momento de establecer el mapa de *fingerprinting*, donde se evidencia que cada etiqueta tiene zonas de gran variación frente a la intensidad de señal percibida para la etiqueta, a pesar de esto, representa un mayor porcentaje de exactitud global al comparar la cercanía entre cada punto de referencia evaluado y la coordenada estimada con el prototipo.

4.2 Resultados de las pruebas de exactitud del prototipo con una persona portando las etiquetas dentro del escenario

En las figuras de este apartado se ilustran los resultados de las cinco rutas recorridas por cada etiqueta dentro del escenario de pruebas y un análisis de estas, especialmente en el porcentaje de exactitud y valores de CDF en distancias menores y mayores a 1m. La Figura 4.2 representa la CDF para la etiqueta A, donde cada ruta presenta diferentes porcentajes de exactitud, la primera de las rutas fijas cuenta con la mejor exactitud con un valor de 78%, sin embargo, en 0,5 y 0,8 m tiene un crecimiento relevante, lo que significa que para estas diferencias se incrementan las disimilitudes entre el punto de referencia y coordenada práctica. Por otro lado, se alcanza una diferencia máxima de 1,4 m igual que en la ruta 2, pero la curva de su función no muestra un crecimiento proporcional, asimismo, tiene la exactitud más baja de todas las rutas fijas con un porcentaje de 70%, además de presentar el comportamiento más cambiante de todas las rutas fijas debido a que se incrementa significativamente en 0,6 m y no se incrementa de igual forma hasta antes de 1 m. La ruta 3, presenta un mejor crecimiento proporcional, sin considerar que tiene más puntos de estudio, sin embargo, presenta error de exactitud más alto entre el punto de referencia y la coordenada práctica con un valor de 1,5 m.

Continuando con el análisis de las rutas de la etiqueta A, las rutas 4 y 5 son las de menor exactitud con un valor de 67%, a pesar de que la ruta 4 presenta gran similitud con la curva de tendencia, inicia su crecimiento mucho antes que las demás rutas, esto quiere decir que presenta diferencias cortas entre el punto de referencia y coordenadas practica a partir de 0,1 m, adicionalmente el crecimiento de la función es proporcional y alcanza la mayor diferencia de todas las rutas realizadas de carácter libre. Finalmente, en la ruta 5 se evidencia un incremento significativo en los valores de 0,3 y 0,6 m, siendo estos los valores de mayor porcentaje. Por lo anterior se concluye que la etiqueta A presenta índices cercanos a los esperados convirtiéndose en una buena opción para implementar en un IPS y en los trabajos futuros.

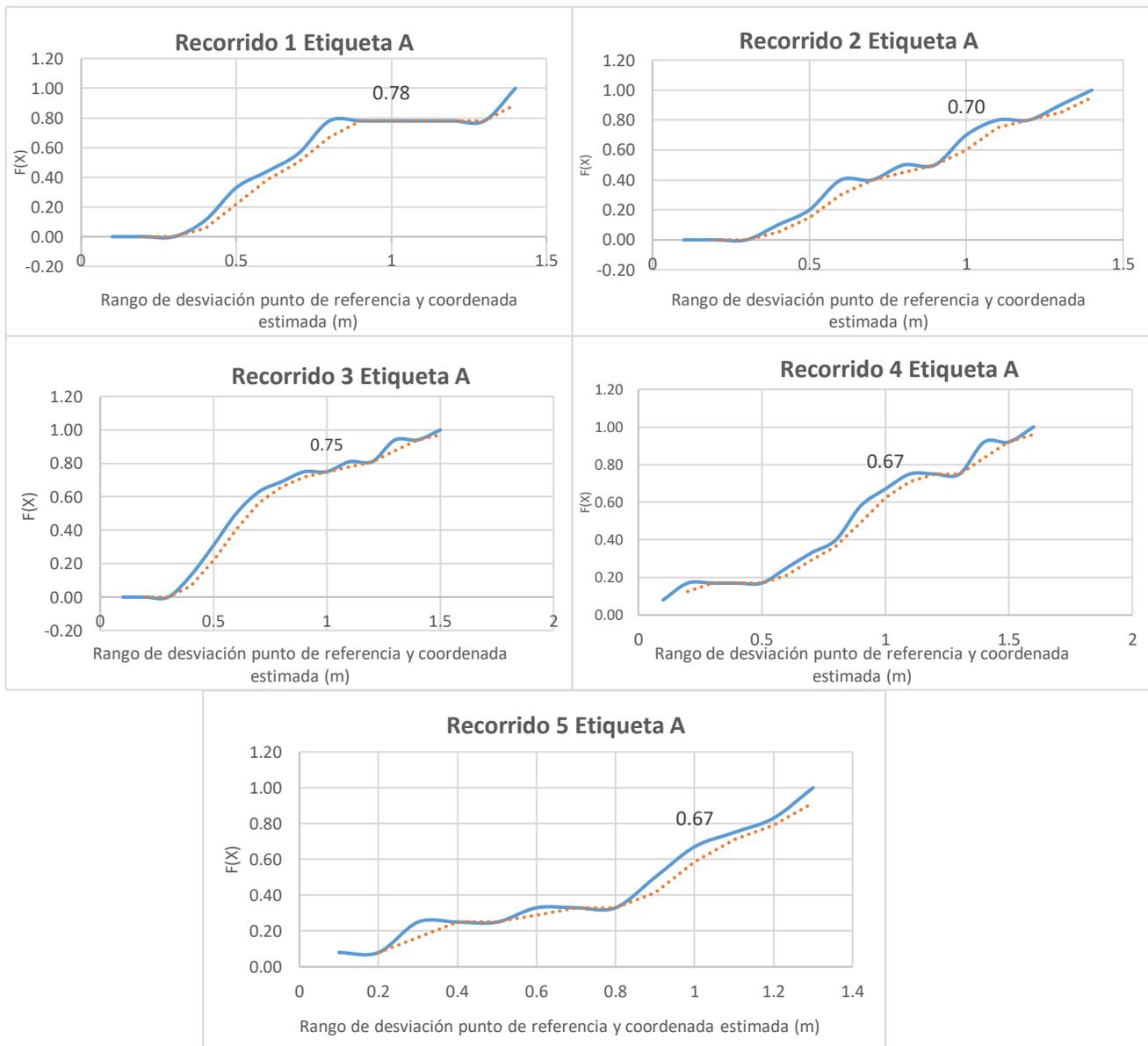


Figura 4.2. Gráficas de CDF para la segunda prueba de la etiqueta A.

La Figura 4.3 corresponde a las gráficas CDF de la etiqueta B, donde se resaltan las rutas número 1 y 5 debido a que presentan la mejor exactitud de todas las rutas con un porcentaje de 67%, teniendo en cuenta que la ruta 1 es fija mientras que el recorrido 5 es libre. La ruta 1 es la que mejor sigue la curva de tendencia considerando que tiene decrecimientos significativos en 0,6 y 0,8 m comparados con los crecimientos significativos en la número 5 en los valores de 0,8 m y en valores previos al criterio de decisión de un metro, arrojando como resultado un comportamiento adecuado el para entrenamiento de sistemas de interiores, pero no en términos de exactitud, es por ello que se concluye que con la etiqueta B se obtienen valores poco favorables, debido a

que alcanza los porcentajes de exactitud más bajos de todas las pruebas desarrolladas en las diferentes rutas con un porcentaje de 58%.

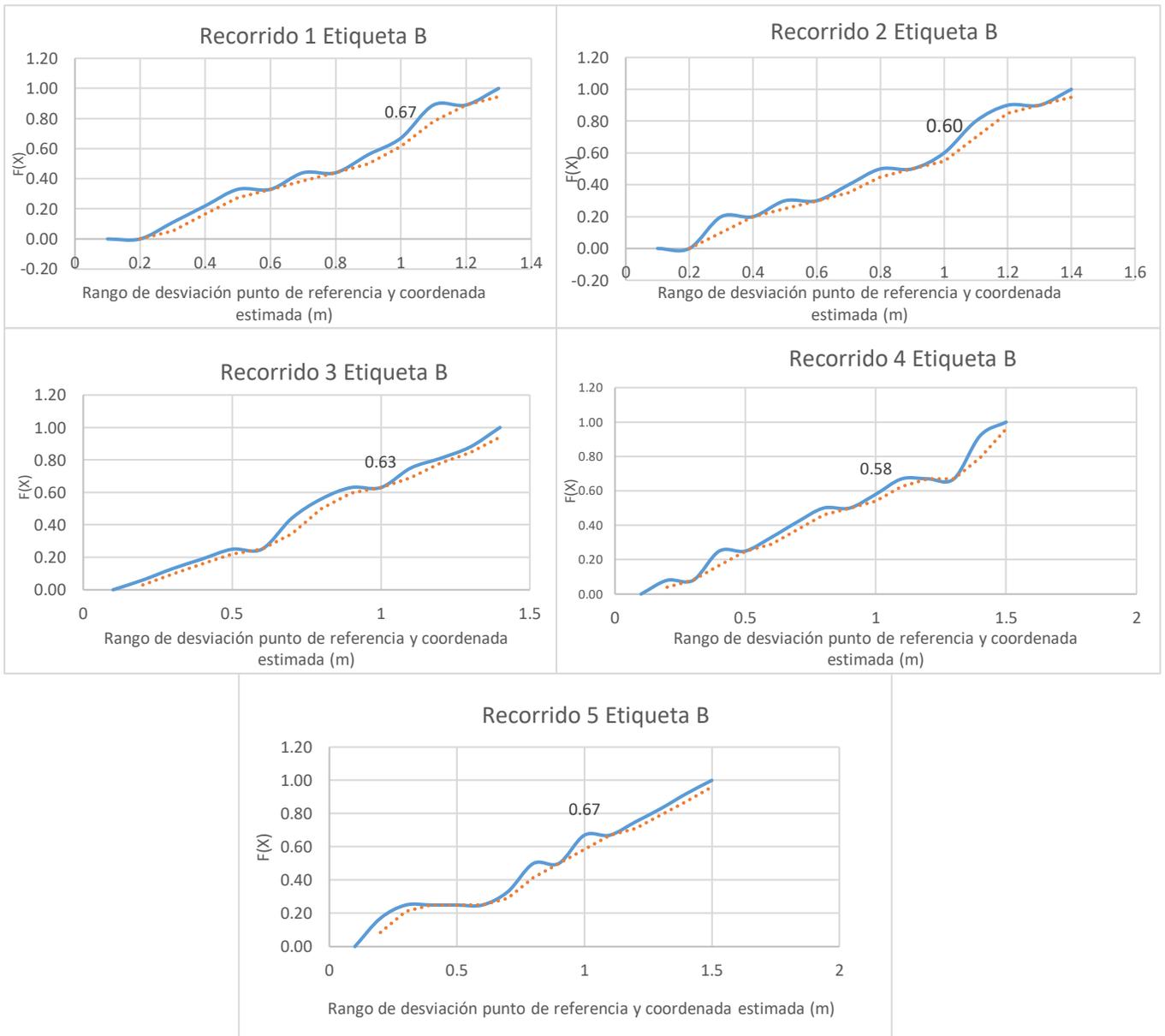


Figura 4.3. Gráficas de CDF para la segunda prueba de la etiqueta B.

En la Figura 4.4 se muestran las gráficas de la CDF para la etiqueta C, en el primer trayecto, la probabilidad de alcanzar errores menores a 0,3 m es nula y las diferencias inician en 0,4 m, comparando con las etiquetas A y B, esta etiqueta presenta un error máximo de 1,2 m. El recorrido 2 y 3 se presentan periodos estables en los valores de 0,5 y 0,7 m y 0,7 a 1 m respectivamente, de esta manera, la exactitud más alta se presenta en la ruta 2 con un 80%, y un promedio de error de 0,641 m. El recorrido 3, tiene la menor exactitud con un 75% y con un error máximo de 1,6 m.

Para finalizar, las rutas libres 4 y 5 presentan la misma exactitud de la ruta 3, sin embargo, la ruta número 4 sigue mejor la curva de tendencia comparada con las demás rutas y se obtiene la menor diferencia entre la coordenada real y estimada de todas las rutas libres con un valor de 1,2 m. En el trayecto 5 hay un punto donde el error es de 1,514 m, el cual es un considerable teniendo en cuenta el área del escenario de pruebas, sin embargo, los demás puntos presentan probabilidades de obtener errores entre 0,4-0,6 m.

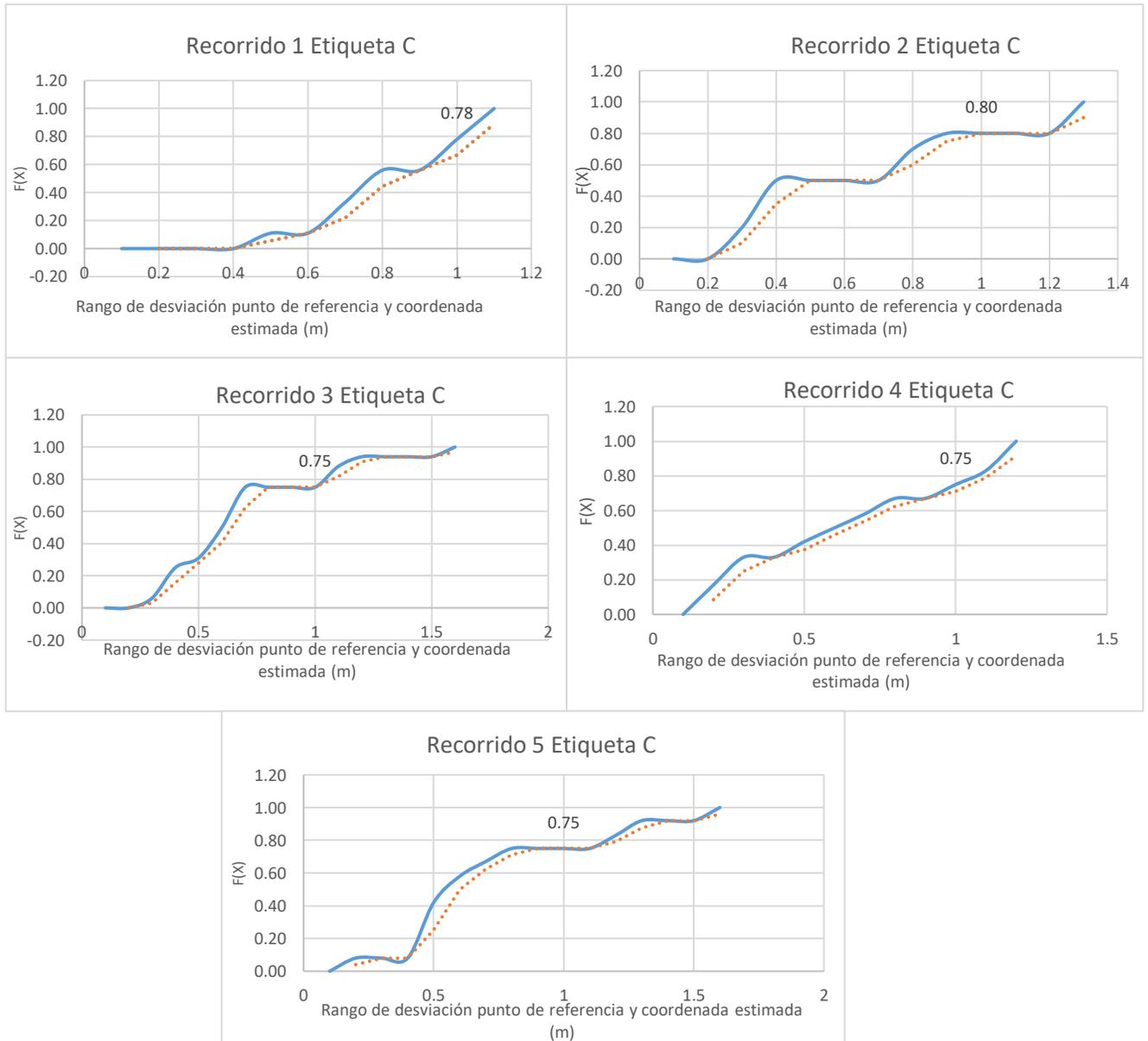


Figura 4.4. Gráficas de CDF para la segunda prueba de la etiqueta C.

A continuación, en la Tabla 4.1, se resumen los resultados de exactitud para todas las rutas. Los resultados de las etiquetas A y C cumplen con el requerimiento de exactitud,

los peores casos se obtienen en la etiqueta B. De manera general, la exactitud de la etiqueta A dentro del escenario planteado es de 71,4%, para la etiqueta B de 63% y para la etiqueta C de 76,6 %.

Tabla 4.1. Resumen de resultados de exactitud.

RUTA	Exactitud por cada etiqueta evaluada (%)		
	A	B	C
1	78	67	78
2	70	60	80
3	75	63	75
4	67	58	75
5	67	67	75
Promedio exactitud	71,4	63	76,6

Empleando la etiqueta C se obtienen mejores resultados para todas las rutas de prueba. Los mapas creados para esta etiqueta C necesitaron menos calibración, las lecturas de RSSI presentaban los menores cambios aleatorios entre puntos cercanos lo cual disminuye los errores. Por otro lado, la combinación de las dos técnicas y la métrica seleccionadas brinda cobertura para la mayor parte del escenario de pruebas debido a los 74 puntos de referencia almacenados en la base de datos cumpliendo con las expectativas de emplear RFID como tecnología en la localización de interiores.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones y la línea futura del trabajo de grado, para el desarrollo de prototipos de localización en la FIET.

5.1 Conclusiones

Los factores como la multitrayectoria, la presencia de una persona y obstáculos dentro del escenario influyen en las lecturas de las etiquetas y por lo tanto la localización en ciertos puntos no es posible, tal como se presenta en los resultados de exactitud de algunas de las rutas realizadas en la segunda prueba.

La combinación de técnicas de localización mejora la exactitud de un sistema de localización. Puesto que, al emplear un sistema híbrido, la exactitud pasa de un 36% empleando únicamente multilateración a un 42% empleando el filtro K-NN. Al combinar multilateración, *fingerprinting* y K-NN se alcanzó una exactitud mínima del 67% y máximo del 80%, por lo cual este diseño se puede emplear en sistemas con un espacio reducido, cabe aclarar que dicha exactitud depende de la etiqueta y la ruta recorrida.

Al seleccionar RSSI como métrica para la localización, la altura, la orientación de los nodos y de las etiquetas son de gran importancia porque las lecturas pueden variar y por tanto la exactitud.

En algunos casos no fue posible la localización dentro del escenario por la orientación de las etiquetas hacia los nodos, en estos puntos la lectura de RSSI cambiaba drásticamente y solo un nodo la realizaba por lo cual no se contaba con la suficiente información para implementar de forma idónea el algoritmo.

Durante los procesos de toma de datos es fundamental el ajuste de datos durante la fase *online* del *fingerprinting* para minimizar los errores y evitar las estimaciones por fuera del escenario, ya que las señales de propagación se ven afectadas por algún cambio dentro del escenario o por los distintos fenómenos que alteran los sistemas de radiofrecuencia, causando estimaciones erróneas, corregibles considerando las características del escenario.

En UHF, al estar una persona portando la etiqueta dentro del escenario, la comunicación entre los dispositivos se ve afectada y por lo tanto el rango de lectura máximo de etiquetas disminuye. Esto se evidencia en las pruebas donde el usuario se desplaza según unas rutas, en algunas de ellas el porcentaje de exactitud es inferior.

El tipo de etiquetas empleadas en la localización influye en los resultados de exactitud, porque presentan un comportamiento diferente en el escenario debido a las distintas características de fábrica, por lo tanto, en la mayoría de las pruebas con la etiqueta C se cumple con los requerimientos establecidos teniendo en cuenta que la probabilidad de errores no supera 1 m.

En el análisis de la exactitud depende del tipo de etiqueta empleado, el modelo de propagación al interior del escenario de pruebas, el número de puntos de referencia, la recolección de datos y sus respectivos ajustes para cumplir con los requerimientos propuestos.

El desarrollo del trabajo de grado ha demostrado que al emplear RFID para la localización en espacios cerrados y reducidos, la exactitud alcanza un porcentaje adecuado y en la mayoría de los casos los errores no superan 1m, acorde a los resultados obtenidos en la bibliografía consultada.

5.2 Trabajos futuros

A continuación, se presentan posibles trabajos futuros que permiten mejorar el prototipo y por lo tanto su exactitud.

Implementar algoritmos de inteligencia artificial en la fase *online* del *fingerprinting* para una localización más exacta. Debido a que el prototipo de localización en interiores implementado se basa en las medidas de los valores RSSI, las características del escenario afectan las señales y pueden generar errores en la exactitud de la localización.

Implementar un filtro Kalman para eliminar medidas aleatorias de RSSI por los cambios bruscos que se producen en los valores al estar un usuario dentro del escenario, de esta manera las estimaciones de la localización de los usuarios son más exactas al usar un modelo matemático más complejo y robusto.

Construir un sistema prototipo de localización basado en RFID dentro del edificio de la FIET, implementando técnicas y métricas diferentes con un hardware y software más complejo y luego realizar una comparación con los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado.

Desarrollar un prototipo RFID que permita estimar la localización de varios usuarios dentro del escenario cerrado con un porcentaje de exactitud mayor al 75%, además de visualizar el recorrido de los usuarios mediante gráficos o una aplicación.

Emplear etiquetas activas con distancias de lectura mayores que permitan aumentar el área del escenario de localización y comparar los resultados con el prototipo propuesto en este trabajo de grado.

REFERENCIAS

- [1] D. Zhang, F. Xia, Z. Yang, L. Yao, and W. Zhao, "Localization Technologies for Indoor Human Tracking," *5th International Conference on Future Information Technology*, pp. 1-6, may. 2010. doi: 10.1109/FUTURETECH.2010.5482731.
- [2] M. A. C. Alvarado y J. C. S. Delgado, "Sistemas y Tecnologías que Facilitan el Posicionamiento Indoor," *Pensamiento Actual*, vol. 17, no. 29, pp. 132-144, dec. 2017. doi 10.15517/PA.V17I29.31585.
- [3] J. M. H. Moya, "La Tecnología RFID," *Man. Form. ACTA*, no. 58, pp. 37-46, 2010.
- [4] F. Seco, K. Koutsou, F. Ramos, y A. R. Jiménez, "Localización Personal en Entornos Interiores con Tecnología RFID," *Rev. Iberoam. Automática E Informática Ind.*, vol. 10, no. 3, pp. 313-324, 2013. doi: 10.1016/j.riai.2013.05.004.
- [5] F. B. Barba, "Estudio de Algoritmos de Localización en Interiores para Tecnologías Móviles de Última Generación," trabajo fin de máster, Departamento de Ingeniería de Sistemas Telemáticos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2012.
- [6] Á. C. Soler y J. J. A. Espín, "Sistema de Reparto de Recursos en un Sistema RFID con Lectores Interferentes y Tags Móviles," trabajo fin de grado, Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España, 2013.
- [7] M. Compte, "Sistema de Posicionamiento en Interiores," UNIGIS, jul. 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.unigis.es/posicionamiento-indoor/>. [Accedido: 04-oct-2020].
- [8] Y. Gu, A. Lo and I. Niemegeers, "A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 13-32, 2009, doi: 10.1109/SURV.2009.090103
- [9] K. W. Kolodziej y J. Hjlem, *Local Positioning Systems - LBS Applications and Services*, CRC Press Taylor & Francis Group, 2006.
- [10] M. Kaluža, K. Beg and B. Vukelić, "Analysis of an Indoor Positioning Systems," *Zbornik Veleučilišta u Rijeci*, vol. 5, no.1, pp. 13-32, 2017. doi: 10.31784/zvr.5.1.2.
- [11] V. Djaja-Josko, M. Kolakowski, K. Broczek and J. Kolakowski, "UWB Positioning System for Elderly Persons Monitoring," *Sensors*, vol. 20, no. 6. mar. 2020. doi:10.3390/s20061574.

- [12] A. Alarifi *et al.*, "Ultra-Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances," *Sensors*, vol. 16, no. 5, may. 2016. doi: 10.3390/s16050707.
- [13] E. Prieto, "¿Sabías que Exactitud no es lo mismo que precisión?," *e-medida*, feb. 2012. [En línea]. Disponible en: <http://materias.df.uba.ar/f1qa2017c1/files/2012/07/exactitud-precision.pdf>. [Accedido: 16-sep-2020].
- [14] L. D.-A. Tabernilla, "Sistema de Localización en Interiores," trabajo fin de grado, UPM, Madrid, España. [En línea]. Disponible en: <http://oa.upm.es/947/>. [Accedido: 10-nov-2020].
- [15] T. Rappaport, "Mobile Radio Propagation," in *Wireless Communications, Principles and Practice*. New Jersey, USA: Prentice Hall, pp. 105-168. [Online]. Available: <http://ee.sharif.edu/~wireless.comm.net/references/Rappaport%20-%20Wireless%20Communications,Principles%20and%20Practice-ISBN%200130422320.pdf>. [Accesed: Oct 03, 2020].
- [16] J. C. Stein, "Indoor Radio WLAN Performance," *Computer Science*, [Online]. Available: <https://studylib.net/doc/8182043/indoor-radio-wlan-performance>. [Accesed: Oct. 04, 2020].
- [17] M. S. Svalastog, "Indoor Positioning - Technologies, Services and Architectures," M.S. thesis, UiO., Oslo, Norway, 2007. [Online]. Available: <https://www.duo.uio.no/handle/10852/9742>. [Accesed: May 2020, 2020].
- [18] R. F. Brena *et al.*, "Evolution of Indoor Positioning Technologies: A Survey," *Journal of Sensors*, vol. 17, pp. 10-21, mar. 2017. doi: 10.1155/2017/2630413.
- [19] J. Xiong, "Pushing the Limits of Indoor Localization in Today's Wi-Fi Networks," Ph. D. thesis, UCL, London, United Kingdom, 2015. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Pushing-the-limits-of-indoor-localization-in-Wi-Fi-Xiong/333ab759d713c4174b75d4b04f69e71c0f589c6d#citing-papers>. [Accesed: May 2020, 2020].
- [20] P. Kriz, F. Maly, and T. Kozel, "Improving Indoor Localization Using Bluetooth Low Energy Beacons," *Mobile Information Systems*, vol. 16, pp. 3-11, apr. 2016. doi: 10.1155/2016/2083094.
- [21] D. Čabarkapa, I. Grujić, and P. Pavlović, "Comparative Analysis of the Bluetooth Low-Energy Indoor Positioning Systems," *12th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TESSKS)*, pp. 76-79, oct. 2015. doi: 10.1109/TESSKS.2015.7357741.

- [22] R. Mautz, "Indoor Positioning Technologies," Ph.D. dissertation, ETH Zürich, Zürich, Switzerland, 2012. doi: 10.3929/ethz-a-007313554.
- [23] M. D. Gutierrez, "Indoor Location Systems Based on ZigBee Networks," bachelor thesis, UE, Southern Savonia, Finland, may. 2012. doi: 10.13140/2.1.4300.1126.
- [24] J. D. Ortiz. C, "RFID: Aplicaciones, Retos y Oportunidades," *Rev. Colomb. Comput.*, vol. 17, no. 2, pp. 102-110, dic. 2016. doi: 10.29375/25392115.2719.
- [25] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee and J. Liu, "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080, nov. 2007. doi: 10.1109/TSMCC.2007.905750.
- [26] S. J. Ingram, D. Harmer, and M. Quinlan, "UltraWideBand Indoor Positioning Systems and their Use in Emergencies," *PLANS 2004. Position Location and Navigation Symposium (IEEE Cat. No.04CH37556)*, Monterey, CA, USA, pp. 706-715, abr. 2004, doi: 10.1109/PLANS.2004.1309063.
- [27] R. de J. U. Ruiz, "Tutorial sobre circuitos RFID," trabajo fin de grado, UDLAP, Cholula, Puebla, México, may 12, 2011. [En línea]. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/urbina_r_rd/. [Accedido: 05-jun-2020].
- [28] J. I. Portillo, A. B. Bermejo y A. M. Bernardos, " Tecnología de Identificación por Radiofrecuencia (RFID): Aplicaciones en el ámbito de la Salud," AETIC, Madrid, España, 2008. [En línea]. Disponible en: <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM001808.pdf>. [Accedido: 05-jun-2020].
- [29] Y. López y L. Manquillo, "Análisis del Desempeño de un Sistema Prototipo de Identificación por Radiofrecuencia para Controlar el Acceso de Personal en la Alcaldía de Popayán," *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*, Medellín, Antioquia, Colombia: Instituto Antioqueño de Investigación, 2016, pp. 361-375. doi: 10.5281/2613946.
- [30] S. Ahuja and P. Potti "An Introduction to RFID Technology," *Communications and Networks*, vol. 2, no. 3, pp. 183-186, aug. 2010. doi: 10.4236/cn.2010.23026.
- [31] S. Ezpeleta "Localización de Interiores Mediante Radiofrecuencia: Estudio, Análisis y Propuestas de Mejora," tesis doctoral, UV, Valencia, España, oct. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://roderic.uv.es/handle/10550/71812>. [Accedido: 03-may-2020].
- [32] J. M. G. Barceló, "Análisis y prueba de un sistema en tecnología de identificación por radiofrecuencia," trabajo fin de grado, UPM, Madrid, España, jun. 2016. [En línea]. Disponible en:

http://oa.upm.es/44163/1/TFG_JOSE_MARIA_GARCIA_BARCELO.pdf.
[Accedido: 03-may-2020].

- [33] J. M. C. Herrera y E. S. Casanovas, "Estudio, Diseño y Simulación de un Sistema de RFID Basado en EPC," trabajo fin de máster, UPC, Barcelona, España. [En línea]. Disponible en:
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3552/40883-2.pdf>.
[Accedido: 03-may-2020].
- [34] P. V. Nikitin and K. V. S. Rao, "Theory and Measurement of Backscattering from RFID Tags," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 48, no. 6, pp. 212-218, Dec. 2006, doi: 10.1109/MAP.2006.323323.
- [35] *ISO/IEC 18000-1:2008, Information technology — Radio frequency identification for item management — Part 1: Reference architecture and definition of parameters to be standardized*, ISO (07/2008). [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/46145.html>. [Accessed: Dic 07, 2020].
- [36] *ISO/IEC 18000-2:2009, Information technology — Radio frequency identification for item management — Part 2: Parameters for air interface communications below 135 kHz*, ISO (10/2009). [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/46146.html>. [Accessed: Dic 07, 2020].
- [37] *ISO/IEC 18000-3:2010, Information technology — Radio frequency identification for item management — Part 3: Parameters for air interface communications at 13,56 MHz*, ISO (11/201). [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/53424.html>. [Accessed: Dic 07, 2020].
- [38] *ISO/IEC 18000-4:2018, Information technology — Radio frequency identification for item management — Part 4: Parameters for air interface communications at 2,45 GHz*, ISO (08/2018). [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/68145.html>. [Accessed: Dic 07, 2020].
- [39] *ISO/IEC 18000-6:2013, Information technology — Radio frequency identification for item management — Part 6: Parameters for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz General*, ISO (01/2013). [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/59644.html>. [Accessed: Dic 07, 2020].
- [40] *ISO/IEC 18000-7:2014, Information technology — Radio frequency identification for item management — Part 7: Parameters for active air interface communications at 433 MHz*, ISO (09/2014). [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/57336.html>. [Accessed: Dic 07, 2020].
- [41] *EPC Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID, Specification for RFID Air Interface*, EPCglobal Inc. (04/2015). [Online]. Available:

https://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/Gen2_Protocol_Standard.pdf.
[Accessed: Dic 07, 2020].

- [42] S. Smiley, "Explaining Backscatter from Basic to Advanced Principles," atlasRFIDstore. 2018. [Online]. Available: <https://www.atlasrfidstore.com/rfid-insider/explaining-backscatter-from-basic-to-advanced-principles>. [Accessed: Dic 02, 2020].
- [43] M. A. Al-Ammar *et al.*, "Comparative Survey of Indoor Positioning Technologies, Techniques, and Algorithms," *2014 International Conference on Cyberworlds*, Santander, pp. 245-252, 2014. doi: 10.1109/CW.2014.41.
- [44] Y. Tseng, C. Huang and S. Kuo, "Positioning and Location Tracking in Wireless Sensor Networks," *Pervasive Communications Handbook*, Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2017. doi: 10.4324/9781315219578.
- [45] Y. Zhao, K. Liu, Y. Ma, and Z. Li, "An Improved k-NN Algorithm for Localization in Multipath Environments," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2014, no. 1, p. 208, dic. 2014, doi: 10.1186/1687-1499-2014-208.
- [46] R. Dela Cruz, "Artificial Neural Network-based Localization in Wireless Sensor Networks," UP, Diliman, Quezon City, Philippines, nov. 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/334082607_Artificial_Neural_Network-based_Localization_in_Wireless_Sensor_Networks. [Accessed: Jun 02, 2020].
- [47] M. Md Din, N. Jamil, J. Maniam and M. A. Mohamed, "Review of Indoor Localization Techniques," *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, no. 2, pp. 201-204, 2018. doi: 10.14419/ijet.v7i2.14.12980.
- [48] M. Bolic, D. Simplot-Ryl and I. Stojmenovic, "Principles and Techniques of RFID Positioning," *RFID Systems: Research Trends and Challenges*, Wiley, 2010, pp.389-415, doi: 10.1002/9780470665251.ch15.
- [49] M. Huang and R. M. Narayanan, "Trilateration-Based Localization Algorithm Using the Lemoine Point Formulation," *IETE Journal of Research*, vol. 60, no. 1, pp. 60-73, 2014. doi: 10.1080/03772063.2014.890826.
- [50] A. Pineda-Briseño, R. Menchaca-Méndez y G. Guzmán, "Enrutamiento y Posicionamiento Integrado en Redes Móviles ad hoc," *Computación y Sistemas*, vol. 20, no. 2, p. 289-307, jun. 2016. doi:10.13053/cys-20-2-2258.
- [51] R. Bernard, "Applying Indoor Positioning Systems: A Primer for Integrators and Security Specialists," Security Industry Association, 2017. [Online]. Available: <https://www.securityindustry.org/2017/11/21/indoor-positioning-systems/>. [Accessed: Mar 04, 2020].

- [52] K. Pahlavan, Xinrong Li and J. P. Makela, "Indoor Geolocation Science and Technology," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 2, pp. 112-118, feb. 2002. doi: 10.1109/35.983917.
- [53] F. Zafari, A. Gkelias and K. K. Leung, "A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2568-2599, 2019. doi: 10.1109/COMST.2019.2911558.
- [54] R. Peng and M. L. Sichitiu, "Angle of Arrival Localization for Wireless Sensor Networks," *2006 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, sep. 2006, vol. 1, pp. 374-382. doi: 10.1109/SAHCN.2006.288442.
- [55] Z. Song, G. Jiang, and C. Huang, "A Survey on Indoor Positioning Technologies," *Theoretical and Mathematical Foundations of Computer Science*, Berlin, Heidelberg, pp. 198-206. doi: 10.1007/978-3-642-24999-0_28.
- [56] K. Yu, I. Sharp, and Y. J. Guo, "Noniterative Position Determination," in *Ground-Based Wireless Positioning*, Chichester, West Sussex, U.K: John Wiley & Sons, Ltd, 2009, pp. 147-172. doi: 10.1002/9780470747988.
- [57] B. O'Keefe, "Finding Location with Time of Arrival and Time Difference of Arrival Techniques," *ECE Senior Capstone Project, 2017 Tech Notes*, p. 3. [Online]. Available: https://sites.tufts.edu/eeseniordesignhandbook/files/2017/05/FireBrick_OKeefe_F1.pdf. [Accessed: Jun 04, 2020].
- [58] A. F. García *et al.*, "Algoritmos de Radiolocalización basados en ToA, TDoA y AoA," *Ing. Región*, no. 14, pp. 9-22, 2015. doi: 10.25054/22161325.689.
- [59] A. Ramírez, "Time of Flight in Wireless Networks as Information Source for Positioning," Ph.D. dissertation, TUM, Munich, Alemania, 2011. [Online]. Available: <https://d-nb.info/1056937106/34>. [Accessed: Sep 21, 2020].
- [60] G. Welch and G. Bishop, "An Introduction to the Kalman Filter," UNC Chapel Hill, North Carolina, USA. [Online]. Available: <https://courses.cs.washington.edu/courses/cse571/03wi/notes/welch-bishop-tutorial.pdf>. [Accessed: Nov 28, 2020].
- [61] S.-H. Lee, I.-K. Lim, and J.-K. Lee, "Method for Improving Indoor Positioning Accuracy Using Extended Kalman Filter," *Mobile Information Systems*, vol.16, jul. 18, 2016. doi: 10.1155/2016/2369103.
- [62] M. Martínez del Horno, "Sistema de Localización para Entornos de Interior Basado en Android," trabajo fin de grado, UCLM, Castilla-La Mancha, España, jun. 2015. [En línea]. Disponible en:

<http://neithan.weebly.com/uploads/5/2/8/0/52807/miguelmartinezdelhorno.pdf>.
[Accedido: 26-nov-2020].

- [63] Y. Zhao, C. Fritsche, F. Yin, F. Gunnarsson, and F. Gustafsson, "Sequential Monte Carlo Methods and Theoretical Bounds for Proximity Report Based Indoor Positioning," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 6, pp. 5372-5386, jun. 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2799174.
- [64] H. Xu, Y. Ding, P. Li, R. Wang, and Y. Li, "An RFID Indoor Positioning Algorithm Based on Bayesian Probability and K-Nearest Neighbor," *Sensors*, vol. 17, no. 8, ago. 2017, doi: 10.3390/s17081806.
- [65] A. Bensky, "Complementary and Developing Technologies," *Wireless Positioning Technologies and Applications, Second Edition*, Norwood, Massachusetts, USA: Artech House, 2016, pp. 355-387. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:10116135>. [Accessed: Nov 28, 2020].
- [66] R. Graña, "Metodologías de Desarrollo de Proyectos informáticos en Entornos Web," trabajo fin de grado, UOC, Barcelona, España. [En línea]. Disponible en: http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/7924/1/rgranas_TFC_0611.pdf. [Accedido: 04-nov-2020].
- [67] F. J. García, A. García y A. Vázquez, "Modelos de proceso," USAL, Salamanca, España, feb. 2020. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.grial.eu/bitstream/grial/1940/1/IS_I%20Tema%203%20-%20Modelos%20de%20Proceso.pdf. [Accedido: 05-nov-2020].
- [68] L. S. Jensen, A. G. Özkil, and N. H. Mortensen, "Prototypes in Engineering Design: Definitions and Strategies," *DS 84: Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference*, 2016, pp. 821-830. [Online]. Available: <https://www.designsociety.org/publication/38892/PROTOTYPES+IN+ENGINEERING+DESIGN%3A+DEFINITIONS+AND+STRATEGIES>. [Accessed: Nov 20, 2020].
- [69] A. Floría, "Prototipado," *SIDAR*. [Online]. Available: <http://www.sidar.org/recur/desdi/traduc/es/visitable/maner/Prototipado.htm>. [Accessed: Nov 18, 2020].
- [70] J. M. Ibáñez de Aldecoa, "Niveles de Madurez de la Tecnología, Technology Readiness Levels.TRLS," [En línea]. Disponible en: <https://www.mincotur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/393/NOTAS.pdf>. [Accedido: 05-nov-2020].
- [71] R. Blog, "Requerimientos Funcionales y No Funcionales, Ejemplos y Tips," *Medium*, nov. 29, 2018. [En línea]. Disponible en:

<https://medium.com/@requeridosblog/requerimientos-funcionales-y-no-funcionales-ejemplos-y-tips-aa31cb59b22a>. [Accedido: 14-oct- 2021].

- [72] P. por pmoinformatica.com, "Requerimientos no Funcionales: Ejemplos," 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.pmoinformatica.com/2015/05/requerimientos-no-funcionales-ejemplos.html>. [Accedido: 14-oct-2021].
- [73] "Capítulo 3 Definición de Requerimientos, Metodología Gestión de Requerimientos," 2016. [En línea]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/metodologiareq/capitulo-iii>. [Accedido: 14-oct- 2021].
- [74] T. Li, S. Ai, S. Tateno, and Y. Hachiya, "Comparison of Multilateration Methods Using RSSI for Indoor Positioning System," *2019 58th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, 2019, pp. 371-375. doi: 10.23919/SICE.2019.8859906.
- [75] N. S. Kodippili and D. Dias, "Integration of Fingerprinting and Trilateration Techniques for Improved Indoor Localization," *2010 Seventh International Conference on Wireless and Optical Communications Networks - (WOCN)*, 2010, pp. 1-6. doi: 10.1109/WOCN.2010.5587342.
- [76] S. Subedi, E. Pauls, and Y. D. Zhang, "Accurate Localization and Tracking of a Passive RFID Reader Based on RSSI Measurements," *IEEE J. Radio Freq. Identif.*, vol. 1, n.º 2, 2017, pp. 144-154. doi: 10.1109/JRFID.2017.2765618.
- [77] J.-S. Bilodeau, A. Bouzouane, B. Bouchard, and S. Gaboury, "An experimental comparative study of RSSI-based positioning algorithms for passive RFID localization in smart environments," *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, vol. 9, n.º 5, 2018, pp. 1327-1343. doi: 10.1007/s12652-017-0531-3.
- [78] M. P. Bucheli Fuentes, y K. L. Muñoz Ibarra, "Análisis del Desempeño de un Sistema Prototipo de Posicionamiento para Interiores Basado en Bluetooth Low Energy (BLE)," trabajo fin de grado, Univ. del Cauca, Popayán, Colombia, 2019.
- [79] Y. B. Bai, S. Wu, H. Wu, and K. Zhang, "Overview of RFID-Based Indoor Positioning Technology," *Proceedings of Geospatial Science Research Symposium II (GSR_II)*, p. 10. doi: 10.1007/978-3-319-93554-6_62.
- [80] N. Singh, and N. Sharma, "A Survey on Various Indoor Localization Techniques in Wireless Sensor Networks," *Int. J. Comput. Organ. Trends*, vol. 12, n.º 1, 2014, pp. 1-4. doi: 10.14445/22492593/IJCOT-V12P301.
- [81] W. Sakpere, M. Adeyeye-Oshin, and N. B. W. Mlitwa, "A State-of-the-Art Survey of Indoor Positioning and Navigation Systems and Technologies," *South Afr. Comput. J.*, vol. 29, n.º 3, 2017, pp. 145-197. doi: 10.18489/sacj.v29i3.452.

- [82] "Indoor location: which technology for which purpose," *ela Innovation*, 2019. [Online]. Available: <https://elainnovation.com/en/indoor-location-which-technology-for-which-purpose/>. [Accessed: Oct 10, 2020].
- [83] S. Zuin, M. Calzavara, F. Sgarbossa, and A. Persona, "Ultra-Wide Band Indoor Positioning System: Analysis and Testing of an IPS Technology," *16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018: Bergamo, Italy*, vol. 51, 2018, pp. 1488-1492. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.292>.
- [84] M. Á. N. Sobrino y J. V. Román, "Sistema de Localización en Redes Wi-Fi Basado en Fingerprint," trabajo fin de grado, Univ. Carlos III de Madrid, Madrid, España.
- [85] A. J. Pérez, F. A. Stramana, A. Cejas, A. Chardon, y A. J. Rubiales, "Algoritmos Avanzados de Posicionamiento en Interiores Utilizando la Combinación de Distintos Tipos de Sensores," *Mecánica Comput.*, vol. 37, n.º 47, Art. n.º 47, nov. 2019.
- [86] J. I. P. García, A. B. B. Nieto, A. M. B. Barbolla, y I. M. Salles, "*Tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID): aplicaciones en el ámbito de la salud*," *Fundación Madri+d para el Conocimiento*, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=UUsHcgAACAAJ>
- [87] "SYS-IoT UHF Reader RU42X Hardware User's Guide," *SYSIOT*, 2019. [Online]. Available: http://www.sysiotrfid.com/product/UHF_RFID_Fixed_Reader_SR_RU420B-rfid.html. [Accessed: Abr 25, 2021].
- [88] EDN, "RFID Basics: Antenna Polarization," *EDN*, oct. 23, 2007. [Online]. Available: <https://www.edn.com/rfid-basics-antenna-polarization/>. [Accessed: Nov 12, 2020].
- [89] "Antenna Circular Polarization," *QRZ NOW - Ham Radio News*, oct. 08, 2015. [Online]. Available: <https://qrznow.com/antenna-circular-polarization/>. [Accessed: Nov 12, 2020].
- [90] "Antena RFID Invengo XCAF 11L/12L Antenas RFID," *Invengo*. [Online]. Available: <https://www.logismarket.com.mx/devbus/antena-rfid/1322376432-p.html>. [Accessed: Nov 12, 2020].
- [91] "RFID Antenna XCAF-12L Ultra High Frequency 902-928 MHz," *Invengo*. [Online]. Available: <http://aihardware.com/uploadImage/PDF/XCAF-12L.pdf>. [Accessed: Nov 12, 2020].
- [92] Y. Wang and X. Zhang, *Internet of Things: International Workshop, IOT 2012, Changsha, China, August 17-19, 2012. Proceedings*. Springer, 2012.

- [93] "AD-843 RFID Inlays," *Avery Dennison*. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/244565648/AD843>. [Accessed: Nov 30, 2020].
- [94] "AD-833 RFID Inlays," *Avery Dennison*. [Online]. Available: <https://www.rfid-soluzioni.com/wp-content/uploads/2009/11/AD833.pdf>. [Accessed: Nov 30, 2020].
- [95] "ALN-9740 Squiggle (Higgs 4)," *ALIEN*, [Online]. Available: [https://www.dipolerfid.es/files/product/pdf_es/83/ALN-9740%20Squiggle%20Higgs4%20\(2015-12-16\).pdf](https://www.dipolerfid.es/files/product/pdf_es/83/ALN-9740%20Squiggle%20Higgs4%20(2015-12-16).pdf). [Accessed: Nov 30, 2020].
- [96] M. Delgado, "Contribución a los Protocolos Anticolisión y Técnicas de Dimensionamiento para Sistemas de Identificación por Radiofrecuencia," trabajo fin de grado, UPCT, Cartagena, España, ene. 2010. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=50136>. [Accedido: 30-nov-2020].
- [97] J. T. Treviño Cortés, "Propagación de RF en las Bandas: LF, MF, HF, VHF, UHF y VHF," trabajo fin de grado, Univ. de las Américas Puebla, Cholula, México. [En línea]. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/trevino_c_jt/. [Accedido: 30-oct-2021]
- [98] "¿Cómo Funciona un Sistema RFID UHF?," *DipoleRFID*, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.dipolerfid.es/blog/Como-Funciona-Sistema-RFID-UHF>. [Accedido: 27-oct- 2021].
- [99] M. T. Hoang *et al.*, "A Soft Range Limited K-Nearest Neighbours Algorithm for Indoor Localization Enhancement," *ArXiv190811480 Eess*, ago. 2019. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1908.11480>. [Accessed: Oct. 28, 2021].
- [100] F. Yu *et al.*, "5 G WiFi Signal-Based Indoor Localization System Using Cluster k-Nearest Neighbor Algorithm," *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, vol. 10, n.º 12, 2014, p. 247525. doi: 10.1155/2014/247525.
- [101] P. Thulasiraman, X. He, T. L. Xu, M. Denko, R. K. Thulasiram, and L. T. Yang, *Frontiers of High Performance Computing and Networking - ISPA 2007 Workshops: ISPA 2007 International Workshops, SSDSN, UPWN, WISH, SGC, ParDMCom, HiPCoMB, and IST-AWSN, Niagara Falls, Canada, August, 28-September 1, 2007, Proceedings*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [102] H. A. Hoyo Mondeja, "Localización de Dispositivos Móviles Usando el Nivel de Intesidad de Señal Recibida (RSSI)," trabajo fin de grado, Univ. Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, Cuba. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1154/Hector%20Alejandro%20Hoyo%20Mondeja.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Accedido: 26-jul-2021].

APÉNDICE A: TABLAS DE RESULTADOS PRIMERA PRUEBA

Tabla A.1. Resultados de la primera prueba de la etiqueta A.

COORDENADAS DEL ENTORNO		COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR	COORDENADAS DEL ENTORNO		COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR
X	Y	X	Y		X	Y	X	Y	
0	1	1,35895	2,0377	0,8549	3	7	3,73585	6,16835	0,5552
0	2	1,195	2,91015	0,7511	3	8	3,65975	6,5134	0,8132
0	3	1,7023	3,40125	0,8745	4	1	3,952	1,96255	0,4819
0	4	1,06905	4,0436	0,535	4	2	3,7058	2,9082	0,4773
0	5	1,72755	4,7202	0,875	4	3	4,0214	2,8516	0,075
0	6	1,1067	5,2552	0,667	4	4	3,87165	3,8181	0,1113
0	7	1,6483	5,70445	1,0483	4	5	3,81245	4,947	0,0974
1	0	0,58545	1,1573	0,6147	4	6	4,10295	6,01245	0,0519
2	0	2,72915	0,6408	0,4854	4	7	3,76795	5,67065	0,6747
3	0	3,3374	0,84785	0,4563	4	8	4,15345	6,5153	0,7463
4	0	3,76665	1,99775	1,0057	5	1	4,4563	2,0952	0,6114
5	0	4,4788	1,7561	0,9159	5	2	4,8348	3,02905	0,5211
6	0	5,0435	1,81865	1,0274	5	3	4,2256	3,4313	0,4432
7	0	5,42685	1,89465	1,2313	5	4	4,83895	3,68485	0,177
1	1	1,25265	2,4307	0,7264	5	5	4,4424	4,5573	0,356
1	2	1,55865	2,88755	0,5244	5	6	4,3895	5,1924	0,5062
1	3	2,22895	3,442	0,653	5	7	2,6447	5,7017	1,3447
1	4	2,1096	3,9998	0,5548	5	8	4,62855	6,3221	0,8593
1	5	2,2304	4,61845	0,6441	6	1	4,923	2,4544	0,9049
1	6	2,25295	5,15695	0,7551	6	2	4,9535	3,0046	0,7253
1	7	2,23725	5,7554	0,8775	6	3	4,9892	3,1335	0,5098
1	8	2,0979	6,17815	1,0635	6	4	5,63215	4,9335	0,5017
2	1	2,61465	2,1371	0,6463	6	6	5,66305	5,1909	0,4382
2	2	2,715	2,2268	0,3751	6	7	4,1465	5,41175	1,2205
2	3	2,7104	3,5001	0,4344	6	8	4,46235	6,01455	1,2556
2	4	2,17655	3,98715	0,0885	7	1	5,4849	2,5573	1,0864
2	5	3,71715	5,6241	0,9135	7	2	5,5336	3,07665	0,9096
2	6	2,95395	5,20115	0,481	7	3	6,3471	1,526	0,8061
2	7	2,88115	5,7792	0,7528	7	4	5,3802	3,3329	0,8759
2	8	5,546	9,39005	1,9044	7	5	5,66355	3,9663	0,8448
3	1	3,3411	1,6373	0,3614	8	1	5,92275	2,36835	1,2437
3	2	2,56235	2,8609	0,4829	8	2	8,84925	5,9535	2,0218
3	3	3,2431	3,34865	0,2125	8	3	6,28185	3,54925	0,9019
3	4	3,0101	4,11375	0,0571	8	4	6,2492	4,4695	0,9063
3	5	2,48745	4,2228	0,4655	8	5	6,27835	3,7687	1,0583
3	6	3,24335	5,02835	0,5008					

Tabla A.2. Resultados de la primera prueba de la etiqueta B.

COORDENADAS DEL ENTORNO		COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR	COORDENADAS DEL ENTORNO		COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR
X	Y	X	Y		X	Y	X	Y	
0	1	0,90835	2,19025	0,7486	3	7	3,37565	5,7733	0,6415
0	2	1,28825	2,8765	0,7791	3	8	2,52365	6,24195	0,9107
0	3	1,6071	3,3865	0,8265	4	1	3,75115	2,338	0,6805
0	4	1,26385	3,98825	0,632	4	2	3,75105	2,4191	0,2437
0	5	0,96435	4,5989	0,5222	4	3	3,81705	3,40845	0,2238
0	6	1,37725	5,219	0,7916	4	4	3,4026	3,9432	0,3
0	7	1,7038	5,8469	1,0287	4	5	3,74995	4,58905	0,2405
1	0	1,7985	1,7691	0,9705	4	6	3,7827	5,44135	0,2997
2	0	2,4839	1,8187	0,941	4	7	3,977	6,40555	0,2974
3	0	3,15935	1,8936	0,9501	4	8	3,3807	6,1661	0,9678
4	0	3,4833	1,9562	1,0116	5	1	4,18795	2,4253	0,8202
5	0	4,3543	1,942	1,0233	5	2	4,6085	3,0235	0,5479
6	0	4,944	1,98235	1,123	5	3	4,29375	3,29905	0,3835
7	0	5,56985	2,06505	1,256	5	4	4,43475	4,0233	0,2829
1	1	1,9975	2,198	0,7795	5	5	4,51305	4,7196	0,281
1	2	2,1004	2,8698	0,7013	5	6	3,98195	5,1974	0,6482
1	3	1,97665	3,35475	0,5195	5	7	4,3488	5,6676	0,7415
1	4	1,6438	3,99855	0,3219	5	8	4,34465	6,0746	1,0169
1	5	2,1746	4,5767	0,6243	6	1	4,95255	2,5645	0,9414
1	6	1,7002	5,2164	0,5254	6	2	4,9164	3,04165	0,7515
1	7	1,82875	5,85145	0,7082	6	3	5,03545	3,43665	0,5294
1	8	2,7638	6,9759	1,0198	6	4	5,1302	3,8267	0,4434
2	1	2,63845	1,7116	0,478	6	6	4,86675	5,0674	0,7338
2	2	2,61105	2,82775	0,5144	6	7	4,9011	5,62665	0,8794
2	3	2,2321	3,44665	0,2517	6	8	5,0381	6,45	0,9121
2	4	2,2945	4,03375	0,1482	7	1	5,4528	2,6726	1,1392
2	5	2,3444	4,82915	0,1922	7	2	5,7088	3,33305	0,9279
2	6	2,54275	5,1509	0,5039	7	3	5,48835	3,6219	0,8173
2	7	2,45395	5,985	0,5559	7	4	6,0852	4,74495	0,5899
2	8	2,7826	6,67665	0,7687	7	5	5,5646	4,0062	0,8729
3	1	3,24345	1,693	0,3673	8	1	6,64445	3,19405	1,2895
3	2	3,085	2,76975	0,3872	8	2	6,37745	3,44005	1,0847
3	3	3,29495	3,49295	0,2872	8	3	6,00745	3,5851	1,0383
3	4	3,1434	3,9742	0,0718	8	4	5,73525	4,13405	1,1344
3	5	3,20075	4,3774	0,3271	8	5	5,9038	4,58135	1,0688
3	6	2,78425	5,24225	0,3939					

Tabla A.3. Resultados de la primera prueba de la etiqueta C.

COORDENADAS DEL ENTORNO		COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR	COORDENADAS DEL ENTORNO		COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR
X	Y	X	Y		X	Y	X	Y	
0	1	0,2287	2,33385	0,6767	3	7	3,2681	5,8861	0,5729
0	2	1,09175	2,859	0,6946	3	8	3,24185	6,3044	0,8564
0	3	1,44125	3,2733	0,7335	4	1	3,7774	2,04655	0,535
0	4	1,37605	3,91835	0,6892	4	2	4,0393	2,02245	0,0226
0	5	1,4839	4,479	0,7864	4	3	3,7918	2,9515	0,1069
0	6	1,2795	5,26905	0,7368	4	4	3,98265	4,03205	0,0182
0	7	2,90235	7,1812	1,454	4	5	3,74355	4,72325	0,1887
1	0	2,10905	1,3861	0,8876	4	6	3,794	5,1277	0,4481
2	0	2,475	1,4705	0,7727	4	7	3,5122	6,1212	0,5026
3	0	3,2303	1,4569	0,7375	4	8	3,8798	6,28565	0,8593
4	0	3,6356	1,67325	0,8562	5	1	4,3749	2,0372	0,6055
5	0	4,38215	1,01165	0,5927	5	2	4,79055	2,10665	0,1175
6	0	4,95345	2,14065	1,1914	5	3	4,254	4,0068	0,6265
7	0	6,6737	3,5154	1,7653	5	4	4,6757	3,86475	0,1757
1	1	1,8916	2,46205	0,8562	5	5	6,6783	7,1565	1,3663
1	2	2,0642	2,97825	0,7228	5	6	5,9043	6,9521	1,0757
1	3	1,5127	3,28495	0,2933	5	7	3,69195	5,61345	0,9531
1	4	1,2856	3,90205	0,151	5	8	4,34005	6,1693	0,973
1	5	1,9042	4,50485	0,5154	6	1	4,872	2,2805	0,8532
1	6	1,993	5,07175	0,6797	6	2	5,04815	2,8311	0,6318
1	7	4,4513	8,31205	1,8461	6	3	5,36915	2,69145	0,3511
1	8	2,7677	6,87925	1,0465	6	4	4,99155	2,82285	0,775
2	1	2,61135	1,87475	0,5336	6	6	4,95155	4,84855	0,7776
2	2	2,6466	2,55865	0,4273	6	7	5,4375	6,29405	0,4513
2	3	2,7308	3,6043	0,4741	6	8	4,54005	6,3065	1,118
2	4	1,0943	4,1028	0,4558	7	1	7,81455	4,85325	1,9692
2	5	2,1077	4,7624	0,1304	7	2	5,5139	2,8952	0,8674
2	6	2,65955	5,2503	0,4993	7	3	5,73915	3,41845	0,6642
2	7	2,7133	5,7363	0,7256	7	4	5,94615	4,2657	0,5434
2	8	2,50905	6,3559	0,8606	7	5	5,5296	4,03995	0,878
3	1	3,1903	1,7114	0,3682	8	1	6,5336	3,2135	1,3276
3	2	3,1387	2,875	0,443	8	2	6,0553	3,2275	1,1498
3	3	4,4074	4,75405	1,1244	8	3	6,25615	2,8371	0,8757
3	4	2,8725	3,81	0,1144	8	4	6,14435	4,0406	0,928
3	5	3,52525	4,801	0,2808	8	5	6,11375	4,35285	0,9971
3	6	2,8818	5,3472	0,3317					

APÉNDICE B: TABLAS DE RESULTADOS SEGUNDA PRUEBA

Tabla B.1. Resultados a partir de las rutas establecidas para la etiqueta A.

RUTA 1 ETIQUETA A									RUTA 2 ETIQUETA A								
COORDENADAS REALES	ANT 1	ANT 2	ANT 3	ANT 4	COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR	COORDENADAS REALES	ANT 1	ANT 2	ANT 3	ANT 4	COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR		
					X	Y							X	Y			
(0,1)	-32 (0,1)	-63 (0,0)	-52 (0,0)	-48 (0,3)	0,1422	1,63055	0,3232	(0,6)	-49 (0,5)	-42 (0,5)	-36 (0,6)	-55 (0,5)	1,7319	4,7112	1,0794		
(1,1)	-37 (1,3)	-47 (1,3)	-41 (1,4)	-56 (1,1)	1,95075	3,46715	1,322	(1,6)	-46 (1,5)	-49 (1,7)	-39 (1,5)	-44 (1,5)	2,176	4,60155	0,9136		
(2,1)	-38 (2,1)	-51 (2,2)	-52 (2,1)	-50 (2,1)	2,52135	2,15775	0,6341	(2,6)	-41 (2,3)	-50 (2,8)	-47 (2,5)	-45 (2,3)	2,5885	3,39175	1,3369		
(3,2)	-41 (3,3)	-58 (3,2)	-48 (3,2)	-43 (3,2)	2,5671	2,86195	0,4823	(3,5)	-48 (3,6)	-59 (3,5)	-51 (3,5)	-39 (3,5)	2,5995	4,37735	0,3702		
(4,2)	-50 (4,1)	-45 (4,3)	-47 (4,2)	-42 (4,3)	3,912	3,6052	0,8038	(4,4)	-50 (4,4)	-45 (4,3)	-57 (4,3)	-35 (4,5)	4,04785	2,95035	0,5254		
(5,3)	-42 (5,3)	-44 (5,5)	-46 (5,3)	-32 (5,4)	4,26175	3,42925	0,427	(5,3)	-46 (5,1)	-37 (5,1)	-48 (5,5)	-42 (5,1)	4,37405	2,44455	0,4184		
(6,3)	-54 (6,5)	-34 (6,0)	-53 (6,0)	-32 (6,4)	5,2802	2,07495	0,5861	(5,2)	-42 (5,3)	-40 (5,2)	-46 (5,3)	-42 (5,1)	4,2832	3,42925	0,7995		
(7,4)	-51 (7,5)	-49 (7,4)	-49 (7,2)	-38 (7,3)	5,3896	3,58785	0,8312	(6,1)	-47 (6,1)	-39 (6,1)	-49 (6,1)	-44 (6,0)	4,88355	2,4354	0,9092		
(8,4)	-47 (8,1)	-31 (8,1)	-50 (8,1)	-40 (8,2)	5,93525	2,3948	1,3077	(7,1)	-56 (7,3)	-49 (7,4)	-64 (7,3)	-42 (7,1)	6,1223	1,77145	0,5843		
								(8,1)	-53 (8,0)	-34 (8,2)	-50 (8,1)	-46 (8,1)	6,1431	2,6667	1,2476		

RUTA 3 ETIQUETA A															
COORDENADAS REALES	ANT 1	ANT 2	ANT 3	ANT 4	COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR	COORDENADAS REALES	ANT 1	ANT 2	ANT 3	ANT 4	COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR
					X	Y							X	Y	
(1,1)	-42 (1,1)	-59 (1,1)	-57 (1,0)	-56 (1,1)	1,38495	1,7488	0,421	(5,5)	-42 (5,3)	-46 (5,3)	-46 (5,3)	-48 (5,7)	4,22195	3,42925	0,8764
(1,2)	-37 (1,3)	-59 (1,1)	-48 (1,3)	-49 (1,2)	1,3688	3,3291	0,6897	(6,4)	-48 (6,4)	-40 (6,4)	-57 (6,6)	-32 (6,4)	5,0392	3,375	0,5731
(1,3)	-42 (1,1)	-47 (1,5)	-41 (1,4)	-56 (1,1)	1,99055	2,5119	0,5521	(6,3)	-50 (6,2)	-45 (6,2)	-47 (6,4)	-35 (6,3)	4,9281	3,1052	0,5385
(1,4)	-49 (1,7)	-49 (1,7)	-34 (1,7)	-48 (1,6)	2,223	5,72	1,0552	(6,2)	-58 (6,4)	-47 (6,4)	-53 (6,0)	-32 (6,4)	5,5564	4,52145	1,2801
(1,5)	-41 (1,4)	-46 (1,6)	-41 (1,4)	-44 (1,5)	2,1763	4	0,772	(5,1)	-49 (5,0)	-40 (5,2)	-53 (5,0)	-48 (5,0)	4,444	1,79275	0,4841
(2,6)	-41 (2,3)	-48 (2,3)	-41 (2,3)	-44 (2,8)	2,63305	3,5	1,2895	(4,1)	-43 (4,2)	-47 (4,2)	-57 (4,1)	-49 (4,0)	3,78045	2,26265	0,6408
(3,6)	-56 (3,7)	-47 (3,7)	-39 (3,7)	-40 (3,7)	3,7417	6,16325	0,3797	(3,1)	-49 (3,4)	-55 (3,4)	-51 (3,5)	-38 (3,4)	3,039	3,91215	1,4562
(4,6)	-54 (4,5)	-57 (4,6)	-44 (4,6)	-42 (4,7)	3,56675	5,4132	0,3647	(2,1)	-38 (2,1)	-48 (2,1)	-60 (2,0)	-50 (2,1)	2,7882	1,2223	0,4095

Tabla B.2. Resultados a partir de las rutas establecidas para la etiqueta B.

RUTA 1 ETIQUETA B								RUTA 2 ETIQUETA B							
COORDENADAS REALES	ANT 1	ANT 2	ANT 3	ANT 4	COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR	COORDENADAS REALES	ANT 1	ANT 2	ANT 3	ANT 4	COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR
					X	Y							X	Y	
(0,1)	(0,1)	(0,1)	(0,1)	(0,3)	1,15985	2,20905	0,8377	(0,6)	(0,6)	(0,5)	(0,6)	(0,6)	1,1528	5,16945	0,7104
	-40	-60	-56	-55					-54	-61	-44	-52			
(1,1)	(1,2)	(1,1)	(1,2)	(1,2)	2,0752	2,9000	1,0916	(1,6)	(1,5)	(1,5)	(1,6)	(1,5)	2,191	4,56455	0,9326
	-44	-54	-52	-55					-51	-53	-46	-52			
(2,1)	(2,0)	(2,2)	(2,1)	(2,0)	2,6163	1,27405	0,3372	(2,6)	(2,4)	(2,4)	(2,4)	(2,4)	2,40035	4,03075	1,0048
	-45	-55	-60	-57					-53	-58	-52	-58			
(3,2)	(3,5)	(3,0)	(3,5)	(3,0)	3,22845	4,40605	1,2084	(3,5)	(3,7)	(3,3)	(3,2)	(3,2)	3,34645	3	1,0149
	-51	-51	-54	-55					-55	-51	-55	-56			
(4,2)	(4,0)	(4,0)	(4,0)	(4,4)	3,58665	1,95615	0,2078	(4,4)	(4,4)	(4,4)	(4,3)	(4,5)	3,4804	3,90605	0,264
	-50	-56	-52	-50					-51	-58	-54	-50			
(5,3)	(5,2)	(5,2)	(5,4)	(5,4)	4,5591	4,1874	0,6333	(5,3)	(5,5)	(5,2)	(5,1)	(5,2)	4,4766	3,14885	0,2721
	-57	-50	-54	-43					-56	-50	-53	-47			
(6,3)	(6,4)	(6,1)	(6,1)	(6,4)	5,18125	2,8234	0,4188	(5,2)	(5,2)	(5,1)	(5,1)	(5,0)	4,5342	2,72615	0,4314
	-58	-45	-53	-39					-57	-48	-53	-52			
(7,4)	(7,3)	(7,4)	(7,5)	(7,3)	5,5056	2,9874	0,9026	(6,1)	(6,3)	(6,3)	(6,3)	(6,2)	5,0038	3,5	1,3456
	-55	-51	-60	-50					-56	-50	-56	-47			
(8,4)	(8,2)	(8,4)	(8,4)	(8,4)	6,05	4,47765	1,0037	(7,1)	(7,2)	(7,3)	(7,1)	(7,1)	5,5332	2,7847	1,1551
	-59	-56	-52	-50					-58	-48	-54	-58			
								(8,1)	(8,1)	(8,0)	(8,1)		6,9042	1,56075	0,6155
									-61	-40	-64	-51			

RUTA 3 ETIQUETA B															
COORDENADAS REALES	ANT 1	ANT 2	ANT 3	ANT 4	COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR	COORDENADAS REALES	ANT 1	ANT 2	ANT 3	ANT 4	COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR
					X	Y							X	Y	
(1,1)	(1,1)	(1,1)	(1,2)	(0,0)	1,96685	2,39615	0,8491	(5,5)	(5,4)	(5,6)	(5,6)	(5,5)	4,0663	4,86135	0,472
	-43	-54	-52	-59					-55	-59	-57	-39			
(1,2)	(1,2)	(1,3)	(1,3)	(1,2)	2,40275	3,36925	1,3767	(6,4)	(6,1)	(6,1)	(6,0)	(6,0)	4,95415	2	1,1285
	-44	-55	-53	-55					-55	-45	-55	-52			
(1,3)	(1,5)	(1,1)	(1,1)	(1,5)	2,2099	2,29595	0,6999	(6,3)	(6,1)	(6,5)	(6,1)	(6,1)	4,7788	2,5875	0,6445
	-51	-54	-56	-52					-55	-55	-53	-51			
(1,4)	(1,3)	(1,4)	(1,4)	(1,4)	1,68	3,97235	0,3403	(6,2)	(6,4)	(6,3)	(6,4)	(6,4)	5,2228	3,87755	1,016
	-48	-60	-50	-53					-58	-50	-59	-39			
(1,5)	(1,6)	(1,5)	(1,5)	(1,5)	2,3169	4,71335	0,6739	(5,1)	(5,3)	(5,3)	(5,4)	(5,3)	4,25685	3,40605	1,2591
	-55	-53	-45	-52					-51	-52	-54	-50			
(2,6)	(2,4)	(2,4)	(2,1)	(2,4)	2,51575	3,39995	1,3254	(4,1)	(4,0)	(4,1)	(4,1)	(4,1)	3,75295	2,38665	0,7042
	-53	-58	-60	-58					-50	-51	-54	-51			
(3,6)	(3,4)	(3,8)	(3,4)	(3,3)	2,6322	3,96925	1,0319	(3,1)	(3,1)	(3,0)	(3,1)	(3,0)	3,28925	1,29765	0,2075
	-52	-61	-53	-49					-48	-51	-60	-55			
(4,6)	(4,7)	(4,7)	(4,7)	(4,7)	4,0044	6,36875	0,1844	(2,1)	(2,2)	(2,2)	(2,1)	(2,0)	2,6482	2,3099	0,7308
	-61	-60	-50	-49					-49	-55	-60	-57			

Tabla B.3. Resultados a partir de las rutas establecidas para la etiqueta C.

RUTA 1 ETIQUETA C								RUTA 2 ETIQUETA C							
COORDENADAS REALES	ANT 1	ANT 2	ANT 3	ANT 4	COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR	COORDENADAS REALES	ANT 1	ANT 2	ANT 3	ANT 4	COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR
					X	Y							X	Y	
(0,1)	(0,2)	(0,1)	(0,1)	(0,1)	0,45405	2,3555	0,7148	(0,6)	(0,6)	(0,6)	(0,6)	(0,5)	1,38745	5,2267	0,7942
	-41	-60	-50	-61					-52	-57	-41	-52			
(1,1)	(1,1)	(1,1)	(1,0)	(1,1)	1,9955	1,9656	0,6934	(1,6)	(1,6)	(1,6)	(1,5)	(1,4)	2,02375	5	0,7155
	-39	-53	-56	-55					-47	-53	-47	-53			
(2,1)	(2,2)	(2,2)	(2,3)	(2,2)	2,57075	3	1,0399	(2,6)	(2,6)	(2,5)	(2,6)	(2,5)	2,07525	5,24515	0,3793
	-49	-54	-49	-49					-53	-59	-45	-57			
(3,2)	(3,3)	(3,1)	(3,2)	(3,2)	4,09535	3,81865	1,0615	(3,5)	(3,6)	(3,5)	(3,6)	(3,5)	3,4146	4,78295	0,234
	-60	-52	-54	-53					-55	-53	-50	-48			
(4,2)	(4,0)	(4,4)	(4,4)	(4,4)	3,7802	3,8618	0,9374	(4,4)	(4,3)	(4,4)	(4,3)	(4,4)	3,81605	3,5431	0,2463
	-48	-49	-52	-43					-47	-49	-56	-43			
(5,3)	(5,3)	(5,4)	(5,3)	(5,2)	4,44685	3,82305	0,4958	(5,3)	(5,3)	(5,2)	(5,2)	(5,2)	4,8734	2,35845	0,327
	-54	-50	-44	-44					-56	-47	-60	-44			
(6,3)	(6,1)	(6,1)	(6,1)	(6,1)	4,85835	2,33255	0,6612	(5,2)	(5,1)	(5,1)	(5,1)	(5,3)	4,39295	2,0431	0,304
	-49	-42	-53	-50					-56	-47	-60	-44			
(7,4)	(7,3)	(7,3)	(7,5)	(7,3)	5,7614	3,143	0,7531	(6,1)	(6,1)	(6,1)	(6,1)	(6,0)	4,86735	2,33255	0,8744
	-55	-43	-58	-43					-49	-42	-53	-49			
(8,4)	(8,3)	(8,4)	(8,4)	(8,4)	6,0327	4	0,9836	(7,1)	(7,0)	(7,1)	(7,1)	(7,1)	6,5766	3,4918	1,2638
	-54	-49	-54	-43					-61	-39	-55	-48			
								(8,1)	(8,2)	(8,1)	(8,1)	(8,2)	6,09065	2,70285	1,2792
									-54	-35	-50	-46			

RUTA 3 ETIQUETA C															
COORDENADAS REALES	ANT 1	ANT 2	ANT 3	ANT 4	COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR	COORDENADAS REALES	ANT 1	ANT 2	ANT 3	ANT 4	COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR
					X	Y							X	Y	
(1,1)	(1,1)	(1,1)	(1,0)	(1,1)	1,9955	1,9656	0,6934	(5,5)	(5,7)	(5,7)	(5,7)	(5,3)	3,7937	5,55455	0,6638
	-39	-53	-56	-55					-53	-59	-52	-43			
(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,3)	(1,2)	2,1253	2,7799	0,6846	(6,4)	(6,4)	(6,4)	(6,5)	(6,4)	4,8097	3,79715	0,6037
	-42	-51	-52	-49					-50	-51	-54	-35			
(1,3)	(1,6)	(1,5)	(1,5)	(1,6)	1,90965	5	1,0986	(6,3)	(6,2)	(6,3)	(6,2)	(6,3)	5,02695	2,8538	0,492
	-47	-55	-47	-53					-53	-47	-55	-42			
(1,4)	(1,3)	(1,4)	(1,5)	(1,3)	1,27895	3,43905	0,3132	(6,2)	(6,1)	(6,2)	(6,1)	(6,2)	4,86095	2,33255	0,5933
	-42	-60	-47	-53					-49	-44	-53	-48			
(1,5)	(1,5)	(1,6)	(1,6)	(1,6)	2,01135	5,06755	0,5068	(5,1)	(5,3)	(5,3)	(5,3)	(5,0)	4,23275	4,00015	1,5484
	-47	-53	-41	-53					-56	-56	-44	-53			
(2,6)	(2,4)	(2,4)	(2,4)	(2,5)	1,1561	4,0822	1,0476	(4,1)	(4,0)	(4,1)	(4,1)	(4,1)	3,72495	2,064	0,5495
	-52	-63	-50	-55					-48	-52	-56	-48			
(3,6)	(3,5)	(3,6)	(3,5)	(3,6)	3,0074	5,29775	0,3511	(3,1)	(3,1)	(3,0)	(3,1)	(3,2)	3,20735	1,7222	0,3757
	-56	-59	-52	-44					-42	-50	-58	-53			
(4,6)	(4,7)	(4,6)	(4,6)	(4,6)	4,151	5,60275	0,2125	(2,1)	(2,3)	(2,3)	(2,2)	(2,2)	2,798	3,20225	1,1712
	-58	-55	-51	-41					-52	-53	-56	-49			

Tabla B.4. Resultados sin ruta previa para la etiqueta A.

RUTA 4 ETIQUETA A								RUTA 5 ETIQUETA A							
COORDENADAS REALES	ANT 1	ANT 2	ANT 3	ANT 4	COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR	COORDENADAS REALES	ANT 1	ANT 2	ANT 3	ANT 4	COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR
					X	Y							X	Y	
(6,7)	-41 (6,7)	-51 (6,6)	-57 (6,6)	-35 (6,6)	4,7018	4,2369	1,5264	(2,8)	-50 (2,7)	-46 (2,7)	-43 (2,8)	-46 (2,7)	2,85905	5,6877	1,2334
(5,7)	-53 (5,8)	-48 (5,6)	-41 (5,6)	-31 (5,6)	4,5001	5,3801	0,8476	(2,7)	-59 (2,5)	-41 (2,6)	-43 (2,6)	-46 (2,7)	3,6799	6,0373	0,9681
(4,7)	-55 (4,8)	-48 (4,8)	-57 (4,6)	-42 (4,7)	4,2643	5,77935	0,6245	(2,6)	-59 (2,5)	-49 (2,5)	-38 (2,7)	-42 (2,6)	3,5562	5,58945	0,8047
(4,6)	-54 (4,5)	-55 (4,5)	-42 (4,7)	-35 (4,5)	3,7496	4,9432	0,543	(2,5)	-43 (2,4)	-57 (2,4)	-47 (2,5)	-39 (2,5)	2,2057	4,4175	0,3089
(3,5)	-41 (3,3)	-58 (3,2)	-39 (3,7)	-40 (3,3)	2,5489	3,51895	0,7741	(2,4)	-44 (2,2)	-51 (2,2)	-57 (2,2)	-50 (2,1)	2,664	2,2788	0,9224
(3,4)	-49 (3,4)	-59 (3,5)	-45 (3,4)	-40 (3,3)	2,59135	4,11215	0,2119	(3,3)	-49 (3,4)	-59 (3,5)	-45 (3,4)	-40 (3,3)	2,59135	4,11215	0,5942
(3,3)	-38 (3,1)	-55 (3,4)	-48 (3,2)	-43 (3,2)	2,8239	2,8355	0,1205	(3,2)	-41 (3,3)	-58 (3,1)	-57 (3,1)	-43 (3,2)	2,68145	2,2369	0,1985
(4,2)	-47 (4,0)	-55 (4,5)	-45 (4,5)	-49 (4,0)	3,38655	4,54755	1,3102	(3,1)	-38 (3,1)	-44 (3,1)	-57 (3,1)	-49 (3,0)	3,28585	1,7105	0,3829
(5,2)	-42 (5,3)	-46 (5,3)	-46 (5,3)	-42 (5,1)	4,21075	3,42925	0,8163	(4,1)	-50 (4,1)	-45 (4,0)	-47 (4,2)	-46 (4,1)	3,8913	2,6052	0,8044
(6,2)	-58 (6,4)	-39 (6,1)	-49 (6,1)	-32 (6,4)	5,61775	4,7287	1,3777	(5,0)	-46 (5,1)	-40 (5,2)	-55 (5,1)	-42 (5,1)	4,4303	2,0402	1,0591
(7,2)	-47 (7,4)	-31 (7,0)	-57 (7,4)	-42 (7,1)	5,52935	3,34515	0,9965	(6,0)	-50 (6,0)	-34 (6,0)	-49 (6,1)	-44 (6,0)	4,9992	2,04055	1,1364
(8,2)	-47 (8,1)	-34 (8,2)	-50 (8,1)	-46 (8,1)	5,90105	2,3948	1,0679	(7,0)	-49 (7,1)	-31 (7,0)	-50 (7,0)	-48 (7,0)	5,4494	1,95945	1,2494

Tabla B.5. Resultados sin ruta previa para la etiqueta B.

RUTA 4 ETIQUETA B								RUTA 5 ETIQUETA B							
COORDENADAS REALES	ANT 1	ANT 2	ANT 3	ANT 4	COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR	COORDENADAS REALES	ANT 1	ANT 2	ANT 3	ANT 4	COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR
					X	Y							X	Y	
(6,7)	(6,7)	(6,7)	(6,6)	(6,7)	4,89885	5,54875	0,9109	(2,8)	(2,8)	(2,7)	(2,8)	(2,7)	2,6739	6,57665	0,7874
	-55	-52	-54	-45					-59	-60	-44	-51			
(5,7)	(5,8)	(5,6)	(5,6)	(5,7)	4,04615	4,86135	1,1709	(2,7)	(2,6)	(2,6)	(2,7)	(2,6)	2,5548	5,15845	0,9617
	-55	-59	-57	-50					-54	-56	-46	-58			
(4,7)	(4,7)	(4,3)	(4,6)	(4,6)	4,51935	5,82495	0,6424	(2,6)	(2,4)	(2,4)	(2,5)	(2,2)	2,49315	4,09005	0,9863
	-61	-51	-52	-50					-53	-58	-49	-52			
(4,6)	(4,3)	(4,7)	(4,3)	(4,1)	3,28055	3,4305	1,3342	(2,5)	(2,5)	(2,5)	(2,6)	(2,5)	2,4817	4,83815	0,2541
	-52	-60	-54	-51					-57	-60	-47	-51			
(3,5)	(3,5)	(3,4)	(3,5)	(3,5)	3,1276	4,40605	0,3038	(2,4)	(2,1)	(2,2)	(2,2)	(2,6)	2,4808	2,83055	0,6322
	-51	-56	-54	-47					-44	-55	-54	-58			
(3,4)	(3,0)	(3,0)	(3,1)	(3,0)	3,30015	1,3099	1,3534	(3,3)	(3,2)	(3,3)	(3,2)	(3,2)	3,1884	2,8225	0,1294
	-49	-51	-60	-55					-49	-51	-55	-56			
(3,3)	(3,2)	(3,1)	(3,2)	(3,1)	3,1677	2,8228	0,122	(3,2)	(3,1)	(3,1)	(3,1)	(3,1)	3,25055	1,79765	0,161
	-49	-54	-55	-52					-48	-54	-60	-52			
(4,2)	(4,5)	(4,5)	(4,0)	(4,5)	3,74595	4,61825	1,3153	(3,1)	(3,3)	(3,4)	(3,3)	(3,3)	3,1302	3,5	1,2517
	-55	-56	-52	-45					-52	-56	-52	-49			
(5,2)	(5,0)	(5,0)	(5,4)	(5,0)	4,3262	1,9305	0,3387	(4,1)	(4,2)	(4,1)	(4,1)	(4,1)	3,81935	2,46125	0,7362
	-52	-46	-54	-53					-53	-51	-54	-51			
(6,2)	(6,1)	(6,1)	(6,0)	(6,2)	4,97795	2,5	0,5689	(5,0)	(5,1)	(5,2)	(5,2)	(5,2)	4,32215	2,79595	1,4385
	-55	-45	-55	-47					-51	-50	-56	-47			
(7,2)	(7,4)	(7,0)	(7,0)	(7,4)	6,12635	4,7067	1,4221	(6,0)	(6,0)	(6,1)	(6,0)	(6,1)	4,9179	1,95125	1,1156
	-61	-40	-55	-43					-54	-45	-55	-51			
(8,2)	(8,0)	(8,1)	(8,0)	(8,1)	6,7314	1,36665	0,709	(7,0)	(7,2)	(7,0)	(7,1)	(7,0)	5,65895	2,2847	1,3246
	-60	-40	-64	-51					-58	-40	-54	-53			

Tabla B.6. Resultados sin ruta previa para la etiqueta C.

RUTA 4 ETIQUETA C								RUTA 5 ETIQUETA C							
COORDENADAS REALES	ANT 1	ANT 2	ANT 3	ANT 4	COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR	COORDENADAS REALES	ANT 1	ANT 2	ANT 3	ANT 4	COORDENADAS ESTIMADAS		ERROR
					X	Y							X	Y	
(6,7)	(6,7)	(6,6)	(6,6)	(6,7)	5,2743	5,75995	0,7184	(2,8)	(2,7)	(2,7)	(2,6)	(2,8)	2,70865	5,6906	1,2078
	-58	-54	-56	-42					-52	-53	-45	-49			
(5,7)	(5,7)	(5,7)	(5,6)	(5,7)	3,77305	5,66745	0,9057	(2,7)	(2,6)	(2,6)	(2,7)	(2,7)	2,70645	5,78125	0,7043
	-53	-59	-49	-43					-53	-54	-41	-48			
(4,7)	(4,5)	(4,5)	(4,8)	(4,5)	3,74875	4,78295	1,1156	(2,6)	(2,6)	(2,6)	(2,6)	(2,5)	2,551	5,24515	0,4673
	-55	-56	-50	-42					-53	-54	-45	-57			
(4,6)	(4,6)	(4,6)	(4,6)	(4,6)	3,7619	5,1657	0,4338	(2,5)	(2,5)	(2,5)	(2,5)	(2,5)	2,1539	4,70285	0,1673
	-54	-55	-51	-41					-54	-59	-50	-57			
(3,5)	(3,3)	(3,3)	(3,3)	(3,4)	4,22155	4,5215	0,656	(2,4)	(2,2)	(2,3)	(2,3)	(2,3)	2,62975	3,5	0,4021
	-60	-49	-50	-44					-49	-53	-49	-48			
(3,4)	(3,5)	(3,4)	(3,4)	(3,5)	3,3262	4,29775	0,2208	(3,3)	(3,5)	(3,1)	(3,1)	(3,1)	3,6532	2,24005	0,501
	-56	-56	-52	-48					-56	-52	-58	-49			
(3,3)	(3,2)	(3,2)	(3,2)	(3,3)	3,23255	2,87935	0,131	(3,2)	(3,2)	(3,2)	(3,2)	(3,2)	3,165	2,87935	0,4473
	-52	-54	-54	-46					-52	-54	-54	-53			
(4,2)	(4,0)	(4,1)	(4,0)	(4,0)	3,5649	1,7411	0,2532	(3,1)	(3,1)	(3,1)	(3,0)	(3,1)	3,14465	1,98215	0,4964
	-48	-52	-54	-56					-42	-52	-56	-49			
(5,2)	(5,2)	(5,2)	(5,2)	(5,2)	4,7157	2,18135	0,1686	(4,1)	(4,1)	(4,1)	(4,1)	(4,0)	3,61985	2,08935	0,5769
	-54	-47	-60	-44					-49	-52	-56	-56			
(6,2)	(6,2)	(6,1)	(6,2)	(6,1)	5,03415	2,3538	0,5143	(5,0)	(5,0)	(5,0)	(5,0)	(5,1)	4,45095	1,1106	0,6195
	-53	-42	-55	-50					-47	-43	-59	-48			
(7,2)	(7,3)	(7,3)	(7,2)	(7,2)	5,6665	3,6462	1,0593	(6,0)	(6,0)	(6,0)	(6,0)	(6,1)	4,90525	2,1129	1,1898
	-55	-43	-53	-44					-52	-45	-49	-50			
(8,2)	(8,1)	(8,2)	(8,1)	(8,2)	6,4349	3,63995	1,1335	(7,0)	(7,0)	(7,0)	(7,1)	(7,0)	6,52905	2,9918	1,5143
	-58	-45	-50	-46					-61	-35	-55	-53			

Análisis de la Exactitud al Emplear RFID como Tecnología para la Localización en Interiores

Paulo César Chávez Tobar, Natalia Paredes Ordóñez
 Departamento de Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia
 paulochavez@unicauca.edu.co
 nataliaparedes@unicauca.edu.co

RESUMEN

Cada vez existen mayores exigencias en cuanto a una mejor exactitud, capacidad y complejidad frente a la localización en interiores. Lo anterior exige a fabricantes y operadores la implementación de nuevas técnicas y métricas en dispositivos de fácil despliegue y escalabilidad que permitan hacer un uso eficiente de los recursos con los que cuenta un sistema de posicionamiento. El artículo analiza la exactitud al emplear RFID como tecnología para la localización en interiores, haciendo uso de Fingerprinting, Multilateración y Filtro K-NN, para analizar aspectos relacionados a la cobertura y capacidad, asegurando la calidad de los servicios ofrecidos.

Palabras claves: *Identificación por radio frecuencia, Multilateración, Fingerprinting, localización, intensidad de señal.*

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha trabajado continuamente en investigaciones y desarrollo de proyectos de sistemas de localización en interiores que han brindado soluciones a un conjunto de desafíos tales como: espacios reducidos, influencia de obstáculos en la propagación de las señales, y movimiento constante dentro del área a estudiar. La localización en interiores de personas, objetos o animales se ha basado en: ultrasonido, infrarrojo, sensores láser y señales de radiofrecuencia, cada una de estas investigaciones establecen diferentes mecanismos para obtener resultados lo más exactos posibles que cumplan con los requerimientos planteados [1].

La mayoría de las implementaciones actuales de sistemas de localización en interiores usan tecnologías de radio para su cometido, ya que poseen la capacidad de penetrar hasta cierto punto las paredes y obstáculos que pueden encontrarse en los entornos interiores. Una de las más destacadas es la Identificación por Radiofrecuencia (RFID, *Radio Frequency Identification*), la cual se ha extendido a un gran número de aplicaciones, desde identificación y seguimiento de animales, personas y objetos, hasta la seguridad y control de acceso en organizaciones, ofreciendo múltiples lecturas simultáneas a distancia de la información contenida en las etiquetas, sin la necesidad de contacto físico entre los dispositivos. Dado a que es una tecnología basada en la radiofrecuencia, es fundamental el uso de estándares internacionales que especifican los diferentes protocolos de comunicación para el intercambio de información lector-etiqueta y modos de operación que regulan

el uso del espectro para conseguir un funcionamiento adecuado [2],[3].

Determinar la localización con un alto nivel de exactitud mediante el uso de esta tecnología, es un reto hoy en día, dado que los componentes que conforman el sistema RFID están expuestos a interferencias y ruido generados por factores externos, la propagación de las ondas radio en interiores se ve afectada por los obstáculos que generan multitrayectoria y reflexión, además se pueden presentar colisiones cuando hay varias etiquetas dispuestas dentro del área de cobertura del lector, ocasionando problemas en la transmisión de la información [4],[5]. Por estas razones en este artículo se propone un prototipo de nivel uno de localización en interiores empleando tecnología RFID con el objetivo de estudiar su exactitud.

En este artículo se presenta los resultados obtenidos de un sistema de prototipado para la localización en interiores empleando RFID, donde cobra mayor importancia el control adecuado de potencia y frecuencia del sistema, debido a que es un limitante frente a la cobertura y dispositivos a implementar. Adicional, se concluye que la implementación de Fingerprinting junto a multilateración y filtro K-NN como una alternativa que proporciona mayor exactitud en conjunto con los resultados obtenidos en la experimentación.

En la sección 1, se presentan los conceptos fundamentales para abordar un sistema de localización en interiores empleando radio frecuencia, en la sección 2, se describe el modelo de prototipado implementado las características del entorno y pruebas implementadas y el comportamiento del algoritmo definido, en la sección 3 se define el desarrollo del sistema de localización en interiores, en la sección 4 se presentan las principales pruebas con sus respectivos análisis de exactitud y finalmente en la sección 5 se describen las conclusiones del trabajo.

II. MARCO TEÓRICO

A. Sistema de Localización en Interiores

Un IPS considera solo ambientes cerrados, tales como: centros comerciales, hospitales, edificios y gimnasios, donde las señales de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, *Global Positioning System*) no llegan. Es un sistema que de forma continua y en tiempo real determina la localización de algo o alguien en un espacio cerrado, de esta manera un el sistema debería funcionar todo el tiempo a menos que el

usuario apague el sistema u ocurra algún tipo de daño [6]. Se compone básicamente de un conjunto de dispositivos empleados para intercambiar señales, estos dispositivos actúan como transmisor o receptor que detectan y procesan los parámetros de la señal para estimar cualquier tipo de información física necesaria para obtener la localización del objetivo, a su vez, cuenta con un programa que recoge todas las mediciones y ejecuta un algoritmo para estimar la posición del objeto o persona.

Las aplicaciones de IPS varían en características, condiciones del entorno, costos y demás factores que aumentan la complejidad del sistema, es por esto que los parámetros de rendimiento juegan un papel importante en el funcionamiento de cada aplicación para hacer frente a los diversos retos y dificultades que se presentan; los principales parámetros de rendimiento son: exactitud, precisión, rango de cobertura y disponibilidad. A su vez, las señales que se propagan en los ambientes cerrados experimentan variaciones debido a la presencia de obstáculos que afectan los distintos resultados. Estas variaciones se presentan en la amplitud, el ángulo y en la velocidad de propagación de las señales alterando la forma de la señal ocasionando que al receptor llegue una versión degradada de la señal original; por lo que es necesario conocer los principales fenómenos que se presentan en ambientes cerrados [7].

B. Conceptos básicos de RFID

Es una tecnología inalámbrica que puede realizar la identificación de cualquier tipo de objeto o persona mediante la comunicación bidireccional entre un lector y una etiqueta.

1) *Componentes de un sistema RFID*: Un sistema RFID básicamente está conformado por dos elementos: un lector y una etiqueta o transpondedor. El lector es un dispositivo electrónico encargado de transmitir ondas radio a la etiqueta para que esta envíe la información que tiene almacenada y, posteriormente, procesarla y verificarla. Consta de un módulo de radiofrecuencia compuesto por un transmisor y un receptor, una unidad de control conformada por un microprocesador y una interfaz de comunicación, y una antena para realizar la comunicación con la etiqueta [8].

Por otra parte, las etiquetas cuentan con una antena y un chip de memoria, donde se almacena la información del objeto. De acuerdo con la fuente de energía utilizada por la etiqueta o transpondedor, esta se puede clasificar en pasivas, activas o semi-activas.

- Las pasivas no cuentan con una fuente de alimentación propia, sino que utiliza la energía emitida por el lector, dicha energía es aprovechada por la etiqueta para generar su propia señal y enviarla nuevamente al lector; estas etiquetas pueden llegar a ser muy económicas y pequeñas, pero su rango de lectura es muy limitado. Sin embargo, a pesar de estas limitaciones, las etiquetas pasivas ofrecen mejores ventajas en términos de costo y vida útil [9].

- Las activas disponen de una fuente de alimentación integrada, lo cual aumenta su capacidad de almacenamiento de información y de transmitir periódicamente la señal de identificación. Aunque su antena es de pequeño tamaño, la señal que radia puede alcanzar una distancia de hasta decenas de metros.
- Las semi-activas, tienen una fuente de poder integrada, la cual energiza al tag para su operación, pero, para transmitir datos utiliza la potencia emitida por el lector, por esto, pueden ser leídas a mayores distancias comparadas con las etiquetas pasivas [10].

2) *Frecuencia de trabajo*: los elementos de un sistema RFID pueden trabajar en diferentes rangos de frecuencias según sea el caso de aplicación, las bandas de frecuencia típicas son descritas a continuación:

- Frecuencia Baja (LF, *Low Frequency*): las aplicaciones que pueden ser implementadas en el rango de los 120-134 KHz son de corto alcance, menor a 0,3 m. Los dispositivos de LF utilizan menos energía y pueden penetrar de mejor manera los materiales compuestos por metales y líquidos.
- Frecuencia Alta (HF, *High Frequency*): se encuentra en el rango de 13.56 MHz, el alcance máximo es de 0,9 m y puede ser utilizado en el área de inventarios o en sistemas de anti-hurto en los supermercados, aeropuertos, bibliotecas y servicios de alquiler.
- Frecuencia Ultra Alta (UHF, *Ultra High Frequency*): las aplicaciones operan en 860-960 MHz con un alcance de 2-5 metros para sistemas pasivos y de 10-12 metros para activos, ambos con la posibilidad de hacer lecturas simultáneas de varias etiquetas.
- Frecuencia de Microondas: trabaja en el rango de 2.45-5.8 GHz y generalmente son aplicaciones con etiquetas activas en la gestión de producción de automóviles, logística militares y cadenas de suministros [11],[12],[13].

3) *Principios de funcionamiento*: el acoplamiento es el modo en el que la etiqueta y el lector realizan el intercambio de datos. Existen dos técnicas para entablar la comunicación: el acoplamiento inductivo y el acoplamiento capacitivo.

- Acoplamiento inductivo: también se le conoce como acoplamiento por campo cercano. El lector activa las etiquetas mediante un campo magnético generado cuando una corriente alterna circula a través de la bobina de su antena. Este campo magnético induce una corriente sobre la antena de la etiqueta para activar su chip y comenzar la transmisión de datos. Las etiquetas utilizan la modulación de carga para enviar datos de vuelta al lector, además la fuerza de un campo magnético disminuye significativamente con la distancia entre los dispositivos, por lo que los sistemas inductivos son intrínsecamente de corto alcance [13],[15].
- Acoplamiento capacitivo: generalmente los IPS que operan con este principio tienen alcances típicos entre 3 a 6 metros en etiquetas pasivas. La figura 1 ilustra el funcionamiento del sistema RFID pasivo que consta de una etiqueta y un lector UHF, este emite una señal de RF que es recibida por la antena de la etiqueta para activar el chip o el Circuito Integrado de Aplicación Específica (ASIC, *Application Specific Integrated Circuit*). Dicha señal es modulada (*modulated backscatter*) al cambiar la impedancia de entrada entre dos estados creando un patrón de unos y ceros que pueden representar el código de identificación de la etiqueta, para luego ser enviada de vuelta al lector [16].

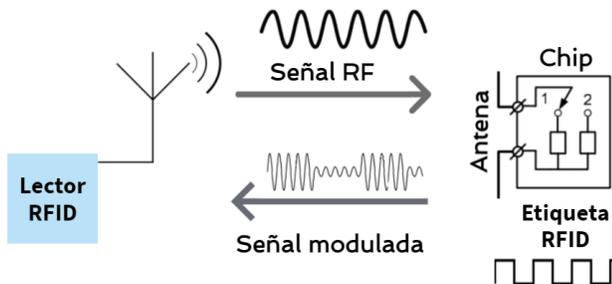


Fig. 1. Acoplamiento capacitivo [16].

4) *Estándares y protocolos*: los estándares RFID describen métodos de prueba y protocolos para el intercambio de datos entre los dispositivos. La Organización Internacional de Estandarización (ISO, International Organization for Standardization) y la organización EPCGlobal han desarrollado la mayoría de los estándares para la tecnología RFID, estos son descritos a continuación.

- ISO: la serie de estándares de ISO relacionada con RFID y las frecuencias que se emplean en dichos sistemas es la serie ISO/IEC 18000: Information Technology – Radio Frequency Identification for Item Management. Esta serie contiene siete partes

diferentes¹ donde se definen una línea de trabajo según la frecuencia a utilizar. La sexta parte de la norma es la más importante en la tecnología RFID, esta describe los protocolos y comandos a utilizarse entre el lector y las etiquetas, así como la regulación de las colisiones. Contiene cuatro tipos diferentes: A, B, C y D, cada uno cuenta con un tipo de codificación y algoritmos usados en la comunicación entre los dispositivos [17].

- EpcGlobal: el Código Electrónico de Producto (EPC, *Electronic Product Code*) permite la identificación en tiempo real de cualquier producto, en cualquier empresa de cualquier parte del mundo. El código EPC en una etiqueta RFID puede identificar al fabricante, producto, versión y número de serie, y adicionalmente provee un grupo de dígitos extra para identificar objetos únicos [15].

C. Técnicas para la localización en interiores

1) *Fingerprinting*: esta técnica consta de dos fases para obtener la localización del objetivo, la primera es la Fase de Calibración o Fase de Entrenamiento (Off-Line Calibration Phase) y la segunda es la Fase de Localización (On-Line Position Determination Phase). En la fase de entrenamiento se construye el mapa fingerprint o la base de datos fingerprint, a partir de las coordenadas de los puntos de referencia y su respectiva intensidad de señal. Estos puntos deben ser significativos y contar con una cantidad mínima que permita obtener resultados adecuados. En la segunda etapa, la fase de localización, se obtienen las mediciones de las señales en lugares donde no se encuentra un punto de referencia y se comparan con los valores que están almacenados en la base de datos para obtener una estimación de la localización.

El principal inconveniente que presenta esta técnica es que la intensidad de señal podría verse afectada por la reflexión, dispersión y difracción en la propagación en espacios cerrados, por esto, la fase de calibración debe repetirse periódicamente. Además, la técnica de *fingerprinting* suele utilizar algún tipo de algoritmo que ayude a mejorar la exactitud en la localización como K-Vecinos más Cercanos (K-NN, *K-Nearest Neighbor*) [18],[19],[20].

- K-Vecinos más Cercanos: en este algoritmo todas las distancias euclidianas² medidas son ordenadas de forma ascendente, con el fin de encontrar los K vecinos más cercanos, es decir, las ubicaciones conocidas más cercanas en el espacio de la señal. Al promediar estas K posibles ubicaciones, se obtiene una localización estimada a través de la ponderación [21]. Se calcula la distancia euclidiana entre el vector de ubicación actual y los vectores del *dataset*

¹ La quinta parte del estándar fue abandonada debido a la falta de uso e interés global [14].

² Es la distancia lineal “ordinaria” entre dos puntos, la cual se deduce a partir del teorema de Pitágoras. La distancia euclidiana entre dos puntos, es la longitud del segmento de línea que los conecta [23] referencia del anteproyecto.

mediante la ecuación (1), donde m corresponde al número de nodos distribuidos en el escenario de prueba y n es el número de puntos de referencia establecidos en la fase fuera de línea. El parámetro P_j es el valor RSSI de la ubicación actual medido en la fase en línea y el parámetro s_{ij} es el vector de ubicación almacenado en el *dataset*. Luego se seleccionan los K vectores del *dataset* con las menores distancias y se genera el resultado de la posición actual con el promedio de las coordenadas de posición correspondientes a los vectores seleccionados [21].

$$d_j = \sqrt{\sum_{i=1}^m (p_j - s_{ij})^2} \quad j = 1, \dots, n \quad (1)$$

- **Multilateración:** es una técnica que se basa en coordenadas de tres o más puntos de referencia para estimar la localización del objetivo, utiliza los parámetros de la señal como el tiempo de llegada o la potencia que se recibe en los dispositivos. Como se muestra en la figura 2, (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) y (x_4, y_4) son las coordenadas de los puntos de referencia A, B, C y D, respectivamente y el punto E es el objetivo con coordenadas desconocidas (x, y) . R_1 , R_2 , R_3 y R_4 son las distancias entre el nodo objetivo E y los puntos A, B, C y D, estas distancias también representan los radios de las circunferencias que se forman. R_1 , R_2 , R_3 y R_4 son también los radios de los tres círculos con orígenes en A, B, C y D, respectivamente [22].

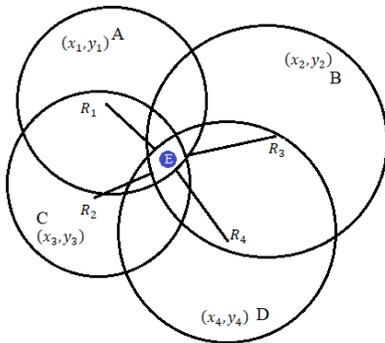


Fig.2. Multilateración con cuatro puntos de referencia. [22]

Por lo tanto, la localización del nodo sensor se puede calcular resolviendo el sistema de ecuaciones (2):

$$\begin{aligned} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 &= R_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 &= R_2^2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = R_3^2$$

$$(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 = R_4^2$$

D. Métrica para la localización en interiores

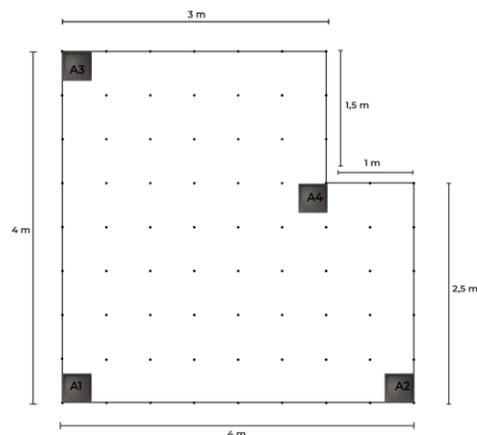
1) **Indicador de Intensidad de Señal (RSSI, Received Signal Strength Indicator):** El valor de la Intensidad de Señal Recibida (RSS, Received Signal Strength) se puede utilizar para estimar la distancia entre el transmisor y un receptor, dado que cuanto mayor es el valor RSS menor es la distancia entre los dispositivos. El valor de RSS es el valor real mientras que RSSI es un indicador, es decir, son valores de RSS promediados durante un cierto periodo. Utilizando el RSSI y un modelo de propagación, la distancia se puede estimar a partir de (3) como:

$$RSSI \text{ (dBm)} = -10n \log_{10}(d) + A \quad (3)$$

Donde n es el exponente para las pérdidas de propagación (el cual toma valores entre 2 y 4 para espacios cerrados) y A es el valor RSSI a una distancia de referencia del receptor [24], [25].

III. DESARROLLO

Teniendo en cuenta la métrica y las dos técnicas seleccionadas, el entorno de localización para el despliegue del prototipo es un espacio cerrado y de un área reducida. El escenario seleccionado se muestra en la figura 4 donde se definieron una serie de coordenadas (X, Y) , en este espacio se ubican cuatro nodos fijos, que corresponden a las antenas del lector, en cada una de las esquinas del área de interés con el fin de brindar la mayor cobertura posible y cumplir con la separación de por lo menos 3 m entre las mismas para evitar interferencias; las coordenadas fijas de los nodos son (0,0) para el nodo 1 (A1), (8,0) para el nodo 2 (A2), (0,8) para el nodo 3 (A3) y (6,5) para el nodo 4 (A4). Los puntos de referencia se determinan dentro del escenario según las coordenadas establecidas, considerando el espacio, se establece una distancia de 0,5 m entre cada punto de referencia, obteniendo así un total de 74 puntos de referencia.



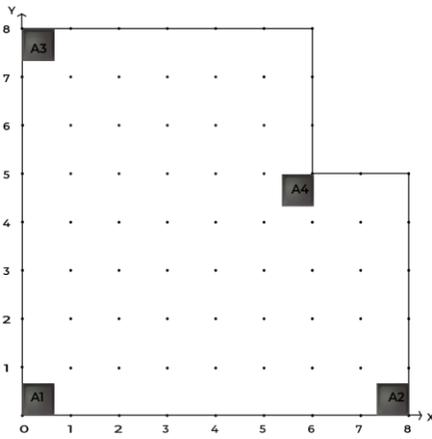


Figura 4. Escenario de pruebas.

La figura 5 representa el diagrama de flujo para el algoritmo de funcionamiento del diseño propuesto, donde se combinan las dos técnicas seleccionadas *fingerprinting* y multilateración. Se establecen dos fases, la primera fase *offline*, se compone de la determinación de las coordenadas de los puntos de referencia, con esto se limita el perímetro del entorno de pruebas del prototipo. Luego, es necesario obtener el valor RSSI de la etiqueta posicionada en cada punto de referencia, estos valores son percibidos por cada uno de los nodos dentro del entorno de pruebas con el objetivo de crear una base de datos que contenga las coordenadas y los valores RSSI.

La implementación de una base de datos es indispensable para tener acceso a esta información en la etapa siguiente, la cual es la fase *online*, donde se debe iniciar con una captura de datos dentro del escenario, se debe ejecutar la multilateración para delimitar un área posible de localizaciones a partir del valor de intensidad de señal percibido dentro del escenario, sin embargo esto crea una ambigüedad dado a la similitud entre algunos puntos, por lo tanto se debe implementar otra etapa dentro de esta segunda fase, la cual es la ejecución del filtro K-NN para estimar una coordenada. Al tener etapas que implican distintas técnicas es necesario prescindir de un ajuste antes de presentar la localización estimada de la etiqueta, ya que algunos resultados pueden dar por fuera del entorno de pruebas.

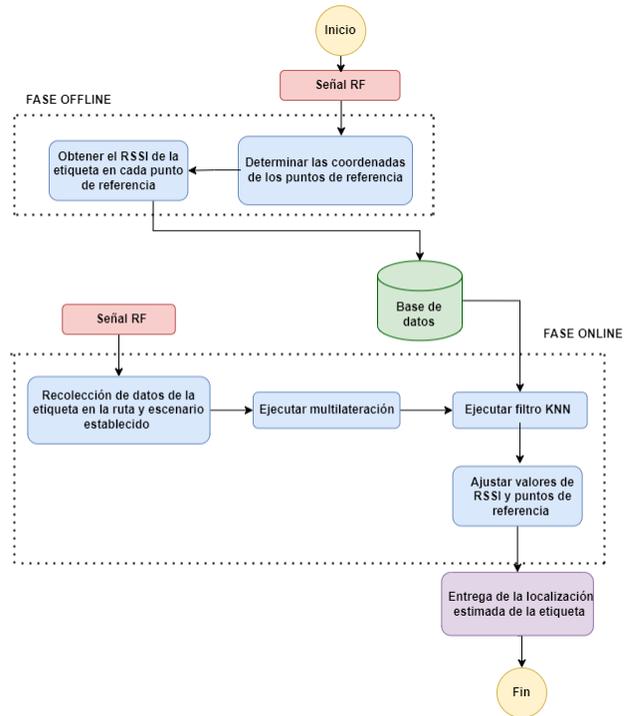


Figura 5. Diagrama de flujo general del prototipo de localización en interiores.

Durante la fase *online* se ejecutan diferentes procesos, el primero de ellos es la multilateración. La figura 6 representa el diagrama de flujo de la multilateración, donde es necesario la recolección de datos del entorno de pruebas, más específicamente del valor RSSI, y por medio del sistema de ecuaciones dado en (2) calcular la distancia entre cada uno de los nodos fijos y la etiqueta presente, con el objetivo de obtener una coordenada estimada a partir de la solución de este sistema de ecuaciones, sin embargo, es necesario un criterio de decisión sumamente relevante, el cual es verificar que la coordenada resultante de la etapa de multilateración está dentro del entorno de pruebas porque de no ser así, se debe repetir la toma de datos, pero cabe aclarar que la toma de datos se debe realizar al mismo instante de tiempo por cada una de las antenas. Por último, teniendo una coordenada estimada válida se grafica para compararla con el valor real del punto estudiado y conocer la exactitud de la técnica.

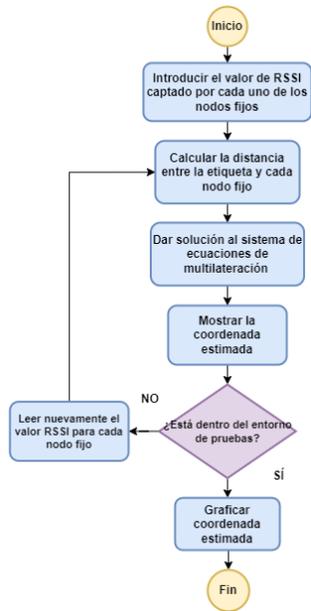


Figura 6. Diagrama de flujo de Multilateración.

Existen varios filtros que se pueden utilizar para disminuir las ambigüedades generadas por la multilateración pues, al ser una técnica que depende directamente de las distancias, los diferentes fenómenos como la multirayectoria y la reflexión afectan el cálculo de dichas distancias y por lo tanto se disminuye la exactitud. El filtro K-NN es una elección típica en los IPS que no requieren de un procesamiento de datos demandable, de complejidad en los cálculos y de alta complejidad computacional, además aumenta la exactitud en la estimación de la localización del objetivo. El diagrama de flujo para este filtro se ilustra en la figura 7. Se determina un vector RSSI con la dimensión de datos a recolectar, es decir, se crea un vector que se compone del número de puntos de estudio, ya que al momento de ingresar los valores leídos por cada una de las antenas o nodos fijos el prototipo debe ser capaz de reconocer si dicha lectura es permitida o si es necesario realizar un ajuste al mismo, esto se debe a que existen factores que influyen directamente en el valor de RSSI, tales como temperatura, pérdidas de propagación, difracción, entre otros. Una vez ingresado al algoritmo los valores percibidos por cada uno de los nodos fijos se presentan las 4 posibles coordenadas más cercanas al valor real para así establecer un ponderado entre ellas y estimar la localización del objeto.

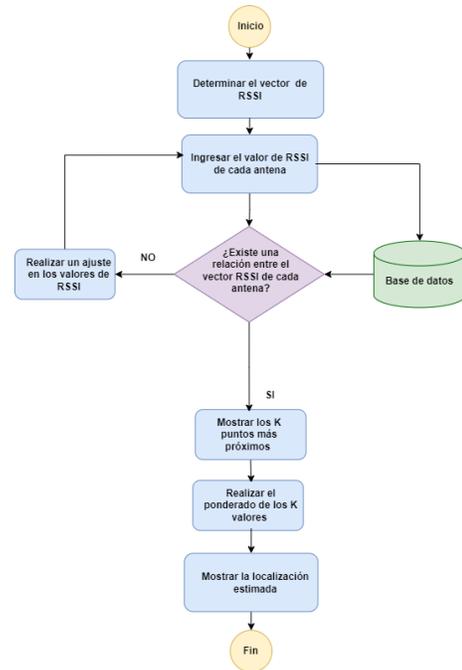


Figura 7. Diagrama de flujo del filtro K-NN.

IV. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE LA EXACTITUD

El propósito de estas pruebas es analizar la exactitud del prototipo de localización cuando una persona porta una etiqueta y camina dentro del entorno de pruebas.

A. Recorrido por el escenario de pruebas a partir de las rutas fijas establecidas

Se seleccionaron tres recorridos, el primero de ellos cuenta con 9 puntos o coordenadas, el segundo tiene un total de 10 coordenadas y el último 16 coordenadas como se observa en la figura 8. Cada uno de estos puntos se marcaron en el suelo del escenario de pruebas para que el usuario se pudiera desplazarse fácilmente. Al estar una persona portando las etiquetas dentro del área, los valores capturados de RSSI varían de manera espontánea, por esta razón se esperan unos milisegundos mientras el sistema se estabiliza para capturar los datos de RSSI por cada coordenada.

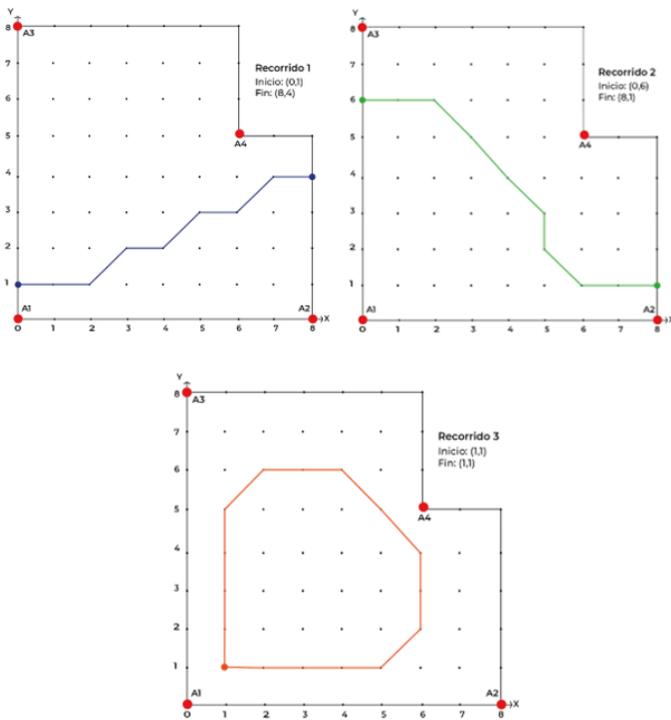


Figura 8. Rutas fijas establecidas dentro del escenario.

Los resultados más relevantes se observan en la figura 9 donde los puntos de color azul son las coordenadas reales y los puntos de color rojo son las coordenadas estimadas luego de ejecutar los algoritmos establecidos. Al analizar todas las rutas con cada una de las etiquetas se concluye que la etiqueta C presenta mejores resultados en todos los casos, donde por lo menos solo dos solo dos coordenadas presentaron errores mayores a 1m, lo cual indica que se obtuvieron resultados satisfactorios.

El peor de los casos en todas las rutas se encuentra en el recorrido 3 de la etiqueta B donde 6 de los 16 puntos evaluados presentan errores mayores a 1m. El punto menos exacto de este recorrido se encuentra en la coordenada (1,2) con un error de 1,3767 m, este error es elevado considerando el espacio de pruebas y la separación entre los puntos reales establecidos dentro del escenario. Es de destacar que los obstáculos y los materiales de los objetos presentes en los ambientes cerrados afectan de forma negativa la propagación de la señal al igual que la orientación de las etiquetas respecto a las antenas del lector. Además, la presencia de un usuario y su constante movimiento dentro del entorno afecta las mediciones de RSSI.

El cuerpo humano posee un 70% de agua, la cual tiene una frecuencia de resonancia de 2,4GHz, esta modifica la media de la señal alrededor de $\pm 1\text{dB}$ y en algunos casos en $\pm 5\text{dB}$, además, parte del valor de RSSI es absorbido por el cuerpo humano [26], [27], por tanto, se atenúa la señal e incluso el usuario puede llegar a bloquear completa o parcialmente la señal dificultando las lecturas, específicamente cuando el usuario está completamente de espaldas hacia alguna de las

antenas o nodos fijos, por esta razón, en algunos puntos evaluados los errores son mayores a 1m.

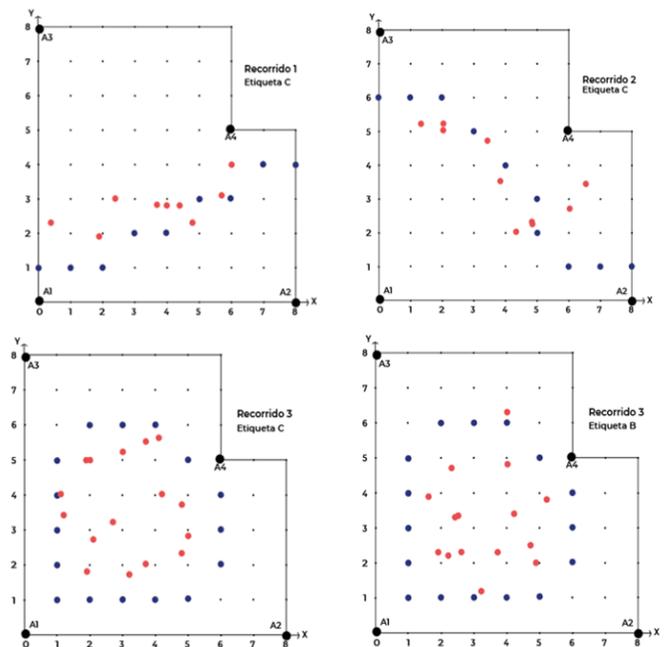


Figura 9. Resultados de los recorridos Etiqueta C.

B. Recorrido libre por el escenario de pruebas

En esta prueba el usuario se desplaza por el área de forma libre portando las etiquetas. La configuración de la potencia del lector, la frecuencia de trabajo y la altura de las antenas o nodos fijos y de la etiqueta es la misma empleada en las pruebas anteriores. Los resultados correspondientes al recorrido 4 se observan en la figura 10, donde los puntos de color rojo son los obtenidos de forma práctica y los de color azul son los puntos reales por los cuales el usuario realizó cada uno de los recorridos. Con la etiqueta B el 41,66% de los puntos evaluados superan el error de 1 m y al igual que en las pruebas anteriores la etiqueta C presenta un mejor desempeño, donde solo 3 puntos de 12 evaluados superan el error de 1 m siendo el más alto de 1,13m en la coordenada (8,2).

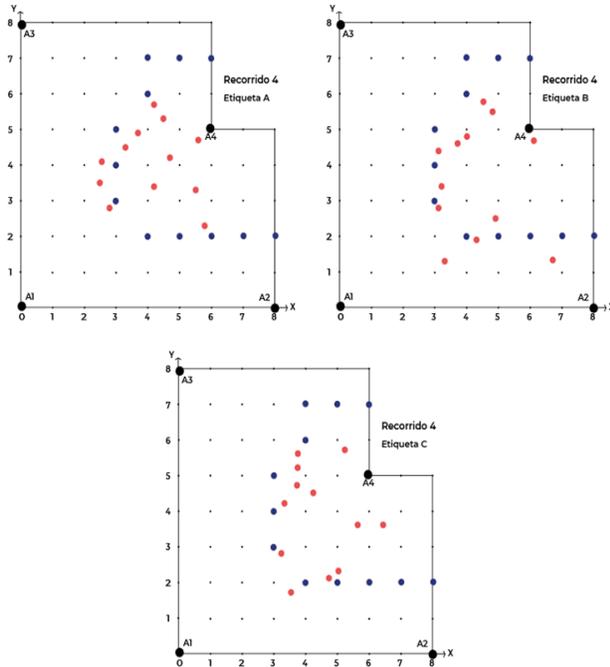


Figura 10. Resultados del recorrido 4.

Los resultados de la ruta 5 se observan en la figura 11, Al analizar los resultados el peor de los casos para el recorrido 5 siempre se presenta en la coordenada (7,0) siendo el error más alto de 1,5143 m, esto se debe a que en este punto no todas los nodos captan el valor de RSSI, principalmente el nodo 3 dificultando la estimación de la localización, además la distancia entre el nodo fijo 3 y esta coordenada es de 5,31m y debido al acoplamiento capacitivo, las lecturas de RSSI cambiaban drásticamente razón por lo cual se realizaron varias mediciones en ese punto.

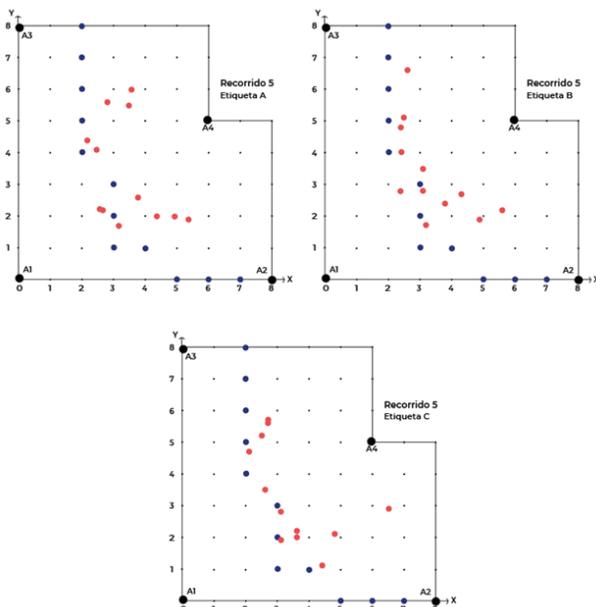


Figura 11. Resultados del recorrido 5.

Al emplear el RSSI se observa que en entornos cerrados las condiciones de propagación son altamente cambiantes y al depender netamente de la distancia al usar multilateración, la localización de los objetivos es errónea, a pesar de que la implementación de multilateración no es tan compleja, el cálculo de las distancias no arroja buenos resultados. La técnica del *fingerprinting* al componerse de dos etapas permite conocer los puntos dentro del escenario de pruebas donde la señal es más débil, en cuáles los errores son mayores, cuál etiqueta es la que mejor trabaja en el escenario propuesto y en cuál nodo se obtiene una mejor cobertura debido a su posición, además al implementar el filtro K-NN en la fase *online* permite mejorar los resultados. Como se ha mencionado los valores RSSI son cambiantes y en ocasiones arrojan valores aleatorios debido al movimiento del usuario que porta la etiqueta, es por esta razón que durante los procesos de toma de datos es fundamental la calibración constante de los mapas de *fingerprint* en la fase *offline* para minimizar los errores.

C. Análisis de la exactitud

Se realiza un análisis a mayor profundidad de las pruebas realizadas en el apartado anterior, utilizando la Función de Distribución Acumulada (CDF, *Cumulative Distribution Function*) para representar por medio de la variable x la diferencia que existe entre cada uno de los puntos de referencia con las coordenadas estimadas, producto de la ejecución de *fingerprinting*, multilateración y filtro K-NN. Con ello se establece el porcentaje de coordenadas prácticas obtenidas que no superan errores mayores a 1m, teniendo en cuenta la diferencia entre los valores de las coordenadas reales con las coordenadas prácticas o estimadas. Lo anterior es llevado a cabo mediante el análisis de la CDF para cada prueba, donde la línea azul describe la probabilidad acumulada. De igual manera se sobrepone la línea puntuada que representa la posible tendencia del sistema si su comportamiento fuera predecible a partir de periodos consecutivos sin evidenciar otros factores.

La figura 12 representa la CDF para la etiqueta A, la primera de las rutas fijas cuenta con la mejor exactitud con un valor de 78%, sin embargo, en 0,5 y 0,8 m tiene un crecimiento relevante, lo que significa que para estas diferencias se incrementan las disimilitudes entre el punto de referencia y coordenada práctica. Por otro lado, las rutas 4 y 5 son las de menor exactitud con un valor de 67%, a pesar de que la ruta 4 presenta gran similitud con la curva de tendencia, inicia su crecimiento mucho antes que las demás rutas, esto quiere decir que presenta diferencias cortas entre el punto de referencia y coordenadas practica a partir de 0,1 m, adicionalmente el crecimiento de la función es proporcional y alcanza la mayor diferencia de todas las rutas realizadas de carácter libre. Finalmente, en la ruta 5 se evidencia un incremento significativo en los valores de 0,3 y 0,6 m, siendo estos los valores de mayor porcentaje. Por lo anterior se concluye que la etiqueta A presenta índices cercanos a los esperados convirtiéndose en una buena opción para implementar en un IPS y en los trabajos futuros.

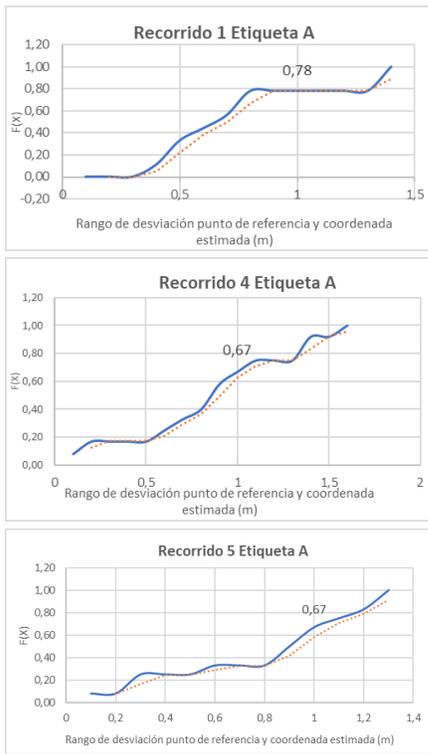


Figura 12. Gráficas CDF para la segunda prueba de la etiqueta A.

La figura 13 corresponde a las gráficas CDF de la etiqueta B, donde se resaltan las rutas número 1 y 5 debido a que presentan la mejor exactitud de todas las rutas con un valor de 67%, teniendo en cuenta que la ruta 1 es la que mejor sigue la curva de tendencia considerando que tiene decrecimientos significativos en 0,6 y 0,8 m comparados con los crecimientos significativos en la número 5 en los valores de 0,8 m y en valores previos al criterio de decisión de un metro, arrojando como resultado un comportamiento adecuado el para entrenamiento de sistemas de interiores, pero no en términos de exactitud, es por ello que se concluye que con la etiqueta B se obtienen valores poco favorables, debido a que alcanza los porcentajes de exactitud más bajos de todas las pruebas desarrolladas en las diferentes rutas con un valor de 58%.

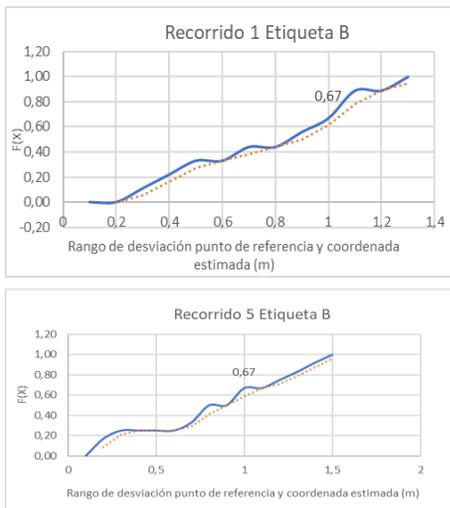


Figura 13. Gráficas CDF para la segunda prueba de la etiqueta B.

En la figura 14 se muestran las gráficas de la CDF para la etiqueta C, el recorrido 2 presenta periodos estables en los valores de 0,5 y 0,7 m, de esta manera, la exactitud más alta se presenta en la ruta 2 con un 80%, y un promedio de error de 0,641 m. Las rutas libres 4 y 5 presentan la misma exactitud de la ruta 3, sin embargo, la ruta número 4 sigue mejor la curva de tendencia comparada con las demás rutas y se obtiene la menor diferencia entre la coordenada real y estimada de todas las rutas libres con un valor de 1,2 m. En el trayecto 5 hay un punto donde el error es de 1,514 m, el cual es un valor alto teniendo en cuenta el área del escenario de pruebas, sin embargo, los demás puntos presentan probabilidades de obtener errores entre 0,4-0,6 m.

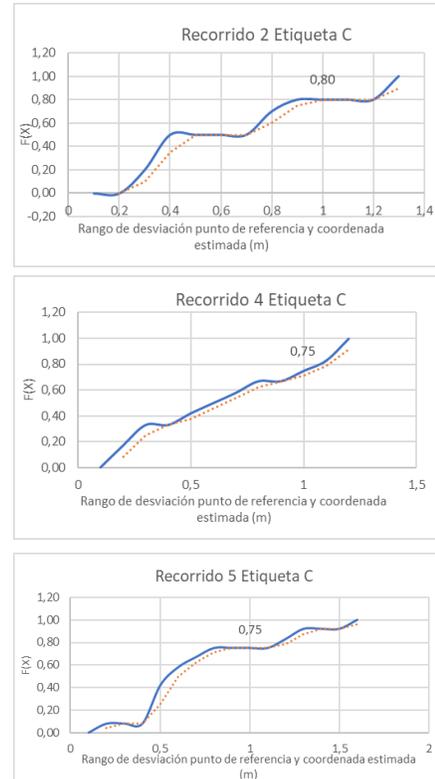


Figura 14. Gráficas CDF para la segunda prueba de la etiqueta C.

En la tabla 1 se muestra el resumen de los resultados obtenidos para esta prueba de este prototipo, donde se concluye que el promedio de error más bajo se obtiene en la etiqueta C para ambos trayectos, además el desplazamiento realizado por el usuario en el trayecto 5 presenta un promedio de error menor comparado con el trayecto 4 para las etiquetas A y B. Empleando la etiqueta C se obtienen mejores resultados para todas las rutas de prueba, teniendo en cuenta que es una etiqueta pasiva UHF y la presencia de una persona dentro del escenario, el prototipo cumple con los requerimientos. Los mapas creados para esta etiqueta C necesitaron menos calibración, las lecturas de RSSI no presentaban cambios aleatorios entre puntos cercanos lo cual disminuye los errores. Por otro lado, la combinación de las dos técnicas y la métrica seleccionadas brinda cobertura para toda el área de interés gracias a los 74 puntos de referencia almacenados en la base de datos cumpliendo con las expectativas de emplear RFID como tecnología en la localización de interiores.

RUTA	Exactitud por cada etiqueta evaluada (%)		
	A	B	C
1	78	67	78
2	70	60	80
3	75	63	75
4	67	58	75
5	67	67	75

Tabla 1. Promedio de error para cada ruta establecida.

Empleando la etiqueta C se obtienen mejores resultados para todas las rutas de prueba. Los mapas creados para esta etiqueta C necesitaron menos calibración, las lecturas de RSSI presentaban los menores cambios aleatorios entre puntos cercanos lo cual disminuye los errores. Por otro lado, la combinación de las dos técnicas y la métrica seleccionadas brinda cobertura para la mayor parte del entorno de pruebas gracias a los 74 puntos de referencia almacenados en la base de datos cumpliendo con las expectativas de emplear RFID como tecnología en la localización de interiores.

V. CONCLUSIONES

Los factores como la multitrayectoria, la presencia de una persona y obstáculos dentro del entorno influyen en las lecturas de las etiquetas y por lo tanto la localización en ciertos puntos no es posible, tal como se presenta en los resultados de exactitud de algunas de las rutas realizadas en la segunda prueba.

La combinación de técnicas de localización mejora la exactitud de un sistema de localización. Puesto que, al emplear un sistema híbrido, la exactitud pasa de un 36% empleando únicamente multilateración a un 42% empleando el filtro K-NN. Al combinar multilateración, fingerprinting y K-NN se alcanzó una exactitud mínima del 67% y máximo del 80%, por lo cual este diseño se puede emplear en sistemas con un espacio reducido, cabe aclarar que dicha exactitud depende de la etiqueta y la ruta recorrida.

Al seleccionar RSSI como métrica para la localización, la altura, la orientación de los nodos y de las etiquetas son de gran importancia porque las lecturas pueden variar y por tanto la exactitud.

En algunos casos no fue posible la localización dentro del entorno por la orientación de las etiquetas hacia los nodos, en estos puntos la lectura de RSSI cambiaba drásticamente y solo un nodo la realizaba por lo cual no se contaba con la suficiente información para implementar de forma idónea el algoritmo.

Durante los procesos de toma de datos es fundamental el ajuste de datos durante la fase online del fingerprinting para minimizar los errores y evitar las estimaciones por fuera del entorno, ya que las señales de propagación se ven afectadas por algún cambio dentro del entorno o por los distintos fenómenos que alteran los sistemas de radiofrecuencia, causando estimaciones erróneas, corregibles considerando las características del escenario.

En UHF, al estar una persona portando la etiqueta dentro del

entorno, la comunicación entre los dispositivos se ve afectada y por lo tanto el rango de lectura máximo de etiquetas. Esto se evidencia en las pruebas donde el usuario se desplaza según unas rutas, en algunas de ellas el porcentaje de exactitud es inferior.

El tipo de etiquetas empleadas en la localización influye en los resultados de exactitud, porque presentan un comportamiento diferente en el entorno debido a las distintas características de fábrica, por lo tanto, en la mayoría de las pruebas con la etiqueta C se cumple con los requerimientos establecidos teniendo en cuenta que los errores no superan 1 m.

En el análisis de la exactitud depende del tipo de etiqueta empleado, el modelo de propagación al interior del entorno de pruebas, el número de puntos de referencia, la recolección de datos y sus respectivos ajustes para cumplir con los requerimientos propuestos.

El desarrollo del trabajo de grado ha demostrado que al emplear RFID para la localización en espacios cerrados y reducidos, la exactitud alcanza un porcentaje adecuado y en la mayoría de los casos los errores no superan 1m, acorde a los resultados obtenidos en la bibliografía consultada.

REFERENCIAS

- [1] M. A. C. Alvarado y J. C. S. Delgado, "Sistemas y Tecnologías que Facilitan el Posicionamiento Indoor," *Pensamiento Actual*, vol. 17, no. 29, pp. 132-144, dec. 2017. doi 10.15517/PA.V17I29.31585.
- [2] J. M. H. Moya, "La Tecnología RFID," *Man. Form. ACTA*, no. 58, pp. 37-46, 2010.
- [3] F. Seco, K. Koutsou, F. Ramos, y A. R. Jiménez, "Localización Personal en Entornos Interiores con Tecnología RFID," *Rev. Iberoam. Automática E Informática Ind.*, vol. 10, no. 3, pp. 313-324, 2013. doi: 10.1016/j.riai.2013.05.004.
- [4] F. B. Barba, "Estudio de Algoritmos de Localización en Interiores para Tecnologías Móviles de Última Generación," trabajo fin de máster, Departamento de Ingeniería de Sistemas Telemáticos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2012.
- [5] Á. C. Soler y J. J. A. Espín, "Sistema de Reparto de Recursos en un Sistema RFID con Lectores Interferentes y Tags Móviles," trabajo fin de grado, Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España, 2013.
- [6] Y. Gu, A. Lo and I. Niemegeers, "A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 13-32, 2009, doi: 10.1109/SURV.2009.090103.
- [7] L. D.-A. Tabernilla, "Sistema de Localización en Interiores," trabajo fin de grado, UPM, Madrid, España. [En línea]. Disponible en: <http://oa.upm.es/947/>. [Accedido: 10-nov-2020].
- [8] J. I. Portillo, A. B. Bernejo y A. M. Bernardos, "Tecnología de Identificación por Radiofrecuencia (RFID): Aplicaciones en el ámbito de la Salud," AETIC, Madrid, España, 2008. [En línea]. Disponible en: <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM001808.pdf>. [Accedido: 05-jun-2020]
- [9] S. Ahuja and P. Potti "An Introduction to RFID Technology," *Communications and Networks*, vol. 2, no. 3, pp. 183-186, aug. 2010. doi:

10.4236/cn.2010.23026.

[10]. R. de J. U. Ruiz, "Tutorial sobre circuitos RFID," trabajo fin de grado, UDLAP, Cholula, Puebla, México, may 12, 2011. [En línea]. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/urbina_r_rd/. [Accedido: 05-jun-2020].

[11]. J. I. Portillo, A. B. Bernejo y A. M. Bernardos, "Tecnología de Identificación por Radiofrecuencia (RFID): Aplicaciones en el ámbito de la Salud," AETIC, Madrid, España, 2008. [En línea]. Disponible en: <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM001808.pdf>. [Accedido: 05-jun-2020].

[12]. S. Ezpeleta "Localización de Interiores Mediante Radiofrecuencia: Estudio, Análisis y Propuestas de Mejora," tesis doctoral, UV, Valencia, España, oct. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://roderic.uv.es/handle/10550/71812>. [Accedido: 03-may-2020].

[13]. J. M. G. Barceló, "Análisis y prueba de un sistema en tecnología de identificación por radiofrecuencia," trabajo fin de grado, UPM, Madrid, España, jun. 2016.

[15]. J. M. C. Herrera y E. S. Casanovas, "Estudio, Diseño y Simulación de un Sistema de RFID Basado en EPC," trabajo fin de máster, UPC, Barcelona, España. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3552/40883-2.pdf>. [Accedido: 03-may-2020].

[16]. P. V. Nikitin and K. V. S. Rao, "Theory and Measurement of Backscattering from RFID Tags," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 48, no. 6, pp. 212-218, Dec. 2006, doi: 10.1109/MAP.2006.323323.

[17]. *ISO/IEC 18000-6:2013, Information technology — Radio frequency identification for item management — Part 6: Parameters for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz General*, ISO (01/2013). [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/59644.html>. [Accessed: Dic 07, 2020].

[18]. Y. Gu, A. Lo and I. Niemegeers, "A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 13-32, 2009, doi: 10.1109/SURV.2009.090103.

[19]. K. W. Kolodziej y J. Hjlem, *Local Positioning Systems - LBS Applications and Services*, CRC Press Taylor & Francis Group, 2006.

[20]. M. A. Al-Ammar *et al.*, "Comparative Survey of Indoor Positioning Technologies, Techniques, and Algorithms," *2014 International Conference on Cyberworlds*, Santander, pp. 245-252, 2014. doi: 10.1109/CW.2014.41.

[21]. H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee and J. Liu, "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080, nov. 2007. doi: 10.1109/TSMCC.2007.905750.

[22]. A. Pineda-Briseño, R. Menchaca-Méndez y G. Guzmán, "Enrutamiento y Posicionamiento Integrado en Redes Móviles ad hoc," *Computación y Sistemas*, vol. 20, no. 2, p. 289-307, jun. 2016. doi:10.13053/cys-20-2-2258.

[23]. P. Kriz, F. Maly, and T. Kozel, "Improving Indoor Localization Using Bluetooth Low Energy Beacons," *Mobile Information Systems*, vol. 16, pp. 3-11, apr. 2016. doi: 10.1155/2016/2083094.

[24]. R. Mautz, "Indoor Positioning Technologies," Ph.D. dissertation, ETH Zürich, Zürich, Switzerland, 2012. doi: 10.3929/ethz-a-007313554.

[25]. F. Zafari, A. Gkelias and K. K. Leung, "A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2568-2599, 2019. doi: 10.1109/COMST.2019.2911558.

[26]. P. Thulasiraman, X. He, T. L. Xu, M. Denko, R. K. Thulasiram, and L. T. Yang, *Frontiers of High Performance Computing and Networking – ISPA 2007 Workshops: ISPA 2007 International Workshops, SSDSN, UPWN, WISH, SGC, ParDMCom, HiPCoMB, and IST-AWSN*, Niagara Falls,

Canada, August, 28-September 1, 2007, Proceedings. Springer Science & Business Media, 2007.

[27] H. A. Hoyo Mondeja, "Localización de Dispositivos Móviles Usando el Nivel de Intesidad de Señal Recibida (RSSI)," trabajo fin de grado, Univ. Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, Cuba. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1154/Hector%20Aejandro%20Hoyo%20Mondeja.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Accedido: 26-jul-2021].

ANEXO 1

Códigos empleados en Matlab para el desarrollo del trabajo de grado.

Multilateración

```
%MULTILATERACION
for ciclo=2:0.2:4
clear all
n=2.4;           % INDICE DE PERDIDAS
A=-41;          % RSSI DE REFERENCIA A UN METRO
CTX = 'RSSI Antena 1: ';
RSSI1 = input(CTX);

    CTY = 'RSSI Antena 2: ';
    RSSI2 = input(CTY);

    CPX = 'RSSI Antena 3: ';
    RSSI3 = input(CPX);

    CPY = 'RSSI Antena 4: ';
    RSSI4 = input(CPY);
%RSSI1=-53.33;      % RSSI DE LA ANTENA 1
%RSSI2=-45.4;      % RSSI DE LA ANTENA 2
%RSSI3=-59.4;      % RSSI DE LA ANTENA 3
%RSSI4=-35.2;      % RSSI DE LA ANTENA 4
R1=10.^( (A-RSSI1) / (10*n) );
R2=10.^( (A-RSSI2) / (10*n) );
R3=10.^( (A-RSSI3) / (10*n) );
R4=10.^( (A-RSSI4) / (10*n) );
%CALCULO DE LA TRILATERACION
% ANTENA 1
% COORDENADAS
X1=0;
Y1=0;
% ANTENA 2
% COORDENADAS
X2=8;
Y2=0;
% ANTENA 3
% COORDENADAS
X3=0;
Y3=8;
% ATENA 4
% COORDENADAS
X4=6;
Y4=5;

a=(X1-X2);
b=(Y1-Y2);
c=(X2-X3);
```

```

d=(Y2-Y3);
e=(X3-X4);
f=(Y3-Y4);

p=( (2*a*2*a) + (2*c*2*c) + (2*e*2*e) );
t=( (2*a*2*b) + (2*c*2*d) + (2*e*2*f) );
w=( (2*b*2*a) + (2*d*2*c) + (2*f*2*e) );
z=( (2*b*2*b) + (2*d*2*d) + (2*f*2*f) );

c11=( (R2.^2) - (R1.^2) + (X1.^2) - (X2.^2) + (Y1.^2) - (Y2.^2) );
c12=( (R3.^2) - (R2.^2) + (X2.^2) - (X3.^2) + (Y2.^2) - (Y3.^2) );
c13=( (R4.^2) - (R3.^2) + (X3.^2) - (X4.^2) + (Y3.^2) - (Y4.^2) );
C=[c11; c12; c13];

N=[p t; w z];
Q = inv(N);

AT=[2*a 2*c 2*e; 2*b 2*d 2*f];

sln = Q*AT*C

X=[NaN,0,0,0,0,0,0,0;
NaN,1,2,3,4,5,6,7;
1,1,1,1,1,1,1,1;
2,2,2,2,2,2,2,2;
3,3,3,3,3,3,3,3;
4,4,4,4,4,4,4,4;
5,5,5,5,5,5,5,5;
6,6,6,6,NaN,6,6,6;
7,7,7,7,7,NaN,NaN,NaN;
8,8,8,8,8,NaN,NaN,NaN];

Y=[NaN,1,2,3,4,5,6,7;
NaN,0,0,0,0,0,0,0;
1,2,3,4,5,6,7,8;
1,2,3,4,5,6,7,8;
1,2,3,4,5,6,7,8;
1,2,3,4,5,6,7,8;
1,2,3,4,5,6,7,8;
1,2,3,4,NaN,6,7,8;
1,2,3,4,5,NaN,NaN,NaN;
1,2,3,4,5,NaN,NaN,NaN];

% COORDENADAS DE LAS ANTENAS
X2=[0,8,0,6];
Y2=[0,0,8,5];
%disp('Hola mundo')
%clear all
end

```

Distancia Euclidiana

```
for ciclo=2:0.2:4
    clear all;

    CX = 'COORDENADA PUNTO DE REFERENCIA X: ';
    C1 = input(CX);

    CY = 'COORDENADA PUNTO DE REFERENCIA Y: ';
    C2 = input(CY);

    CX = 'COORDENADA X MULTILATERACION :';
    CORTX = input(CX);

    CY = 'COORDENADA Y MULTILATERACION: ';
    CORTY = input(CY);

    CPX = 'COORDENADA X FILTRO KNN: ';
    CP1 = input(CPX);

    CPY = 'COORDENADA Y FILTRO KNN: ';
    CP2 = input(CPY);

    P1=( (CORTX+CP1)/2);
    P2=( (CORTY+CP2)/2);

    P11=((P1-C1).^2);
    P22=((P2-C2).^2);
    U=sqrt(P11+P22);

    U2=U*0.5;
    disp(U2)
end
```

Filtro K-NN + Multilateración

```
%FILTRO KNN + MULTILATERACION
```

```
%ETIQUETA A
```

```
for ciclo=0:0.2:3
```

```
    clear all;
```

```
X=[NaN,0,0,0,0,0,0,0,0;  
   NaN,1,2,3,4,5,6,7;  
   1,1,1,1,1,1,1,1;  
   2,2,2,2,2,2,2,2;  
   3,3,3,3,3,3,3,3;  
   4,4,4,4,4,4,4,4;  
   5,5,5,5,5,5,5,5;  
   6,6,6,6,NaN,6,6,6;  
   7,7,7,7,7,NaN,NaN,NaN;  
   8,8,8,8,8,NaN,NaN,NaN];
```

```
Y=[NaN,1,2,3,4,5,6,7;  
   NaN,0,0,0,0,0,0,0;  
   1,2,3,4,5,6,7,8;  
   1,2,3,4,5,6,7,8;  
   1,2,3,4,5,6,7,8;  
   1,2,3,4,5,6,7,8;  
   1,2,3,4,5,6,7,8;  
   1,2,3,4,NaN,6,7,8;  
   1,2,3,4,5,NaN,NaN,NaN;  
   1,2,3,4,5,NaN,NaN,NaN];
```

```
RSSIA1=[NaN,-32.01,-40.78,-39.20,-47.12,-49.57,-50.15,-48.31;  
        NaN,-32.01,-40.78,-39.20,-47.12,-49.57,-50.15,-48.31;  
        -42.65,-38.54,-37,-41.02,-46.90,-47.90,-49.89,-47.48;  
        -38.54,-44.05,-41.04,-43.33,-59.92,-50.4,-50.93,-66.2;  
        -38.98,-42.03,-41,-49.57,-42.69,-48.04,-56.10,-54.40;  
        -50.82,-43.33,-49.57,-50.46,-54.85,-58.96,-53.77,-55.42;  
        -46.90,-54.92,-42.69,-54.85,-49.89,-54.13,-51.90,-53.33;  
        -47.90,-50.4,-48.04,-58.96,NaN,-59,-41.15,-46.77;  
        -49.89,-50.93,-56.10,-47.48,-51.90,NaN,NaN,NaN;  
        -47.48,-66.2,-54.40,-55.42,-53.33,NaN,NaN,NaN];
```

```
RSSIA2=[NaN,-52.6,-54.7,-41.5,-48.95,-42.6,-50.2,-50.4;  
        NaN,-61.8,-46.7,-45.4,-45.25,-38.2,-34.9,-31.3;  
        -59.1,-57.4,-47.16,-53.92,-47.7,-46.2,-49.1,-50.9;  
        -48.2,-51.2,-48.78,-57.1,-49.8,-41.5,-46.2,-50.2;  
        -44.2,-58.15,-44.5,-55.2,-59.1,-49.8,-47.7,-42.6;  
        -49.2,-47.65,-45.4,-50.2,-55.2,-57.1,-53.89,-48.95;  
        -37.7,-40.1,-46.3,-45.4,-44.5,-48.69,-64.2,-41.5;  
        -39.3,-45.25,-40.1,-47.65,NaN,-51.2,-57.4,-54.7;  
        -37.2,-39.3,-37.7,-49.2,-44.2,NaN,NaN,NaN;  
        -31.3,-34.9,-38.2,-45.25,-45.4,NaN,NaN,NaN];
```

```
RSSIA3=[NaN,-53.4,-46.2,-45.95,-45.35,-38.2,-36.6,-31;  
        NaN,-57.2,-60.5,-59.4,-47.2,-53.8,-53.3,-50.86;
```

```

-46.3,-46.3,-48.99,-41.1,-39.7,-38.6,-34.1,-31;
-52.4,-57.8,-41,-44.1,-47.1,-43.3,-38.6,-36.6;
-57.6,-48.4,-48.4,-45.95,-51.7,-47.1,-39.7,-38.2;
-57.2,-47.5,-57.6,-53.5,-45.95,-44.1,-42.98,-45.35;
-54.65,-54.6,-46.3,-57.6,-48.4,-41,-47,-45.95;
-49.2,-50.3,-54.6,-47.5,NaN,-57.8,-46.3,-46.2;
-48.4,-49.2,-64.65,-57.2,-57.6,NaN,NaN,NaN;
-50.86,-53.3,-53.8,-47.2,-59.4,NaN,NaN,NaN];

RSSIA4=[NaN,-54.5,-55.4,-48.55,-63.7,-55.7,-63.7,-48.55;
NaN,-61.4,-56.1,-49.3,-49.4,-48.75,-44.3,-48.75;
-56.1,-49.3,-44.99,-42.07,-44.3,-48.75,-49.4,-49.3;
-50.4,-44.3,-45,-42.7,-39.6,-42.7,-46.6,-44.3;
-44.3,-43.1,-40.3,-38.9,-39.5,-38.9,-40.3,-43.1;
-46.6,-40.3,-42.6,-38.15,-35.2,-38.15,-42.76,-40.3;
-42.7,-38.9,-38.15,-32.75,-32,-31.08,-38.15,-38.9;
-39.6,-39.5,-35.2,-32,NaN,-32,-35.2,-39.5;
-42.7,-38.9,-38.15,-32.75,-32,NaN,NaN,NaN;
-46.6,-40.3,-42.6,-38.15,-35.2,NaN,NaN,NaN];

CX = 'COORDENADA DEL PUNTO DE REFERENCIA EJE X: ';
CORTX = input(CX);

CY = 'COORDENADA DEL PUNTO DE REFERENCIA EJE Y: ';
CORTY = input(CY);

CTX = 'RSSI Antena 1: ';
RSSI1 = input(CTX);

CTY = 'RSSI Antena 2: ';
RSSI2 = input(CTY);

CPX = 'RSSI Antena 3: ';
RSSI3 = input(CPX);

CPY = 'RSSI Antena 4: ';
RSSI4 = input(CPY);
n=3; % INDICE DE PERDIDAS
A=-35.6; % RSSI DE REFERENCIA A UN METRO

R1=10.^( (A-RSSI1) / (10*n) );
R2=10.^( (A-RSSI2) / (10*n) );
R3=10.^( (A-RSSI3) / (10*n) );
R4=10.^( (A-RSSI4) / (10*n) );

%CALCULO DE LA MULTILATERACION
% ANTENA 1
% COORDENADAS
X1=0;
Y1=0;
% ANTENA 2
% COORDENADAS
X2=8;

```

```

Y2=0;
% ANTENA 3
% COORDENADAS
X3=0;
Y3=8;
% ATENA 4
% COORDENADAS
X4=6;
Y4=5;

a=(X1-X2);
b=(Y1-Y2);
c=(X2-X3);
d=(Y2-Y3);
e=(X3-X4);
f=(Y3-Y4);

p=( (2*a*2*a) + (2*c*2*c) + (2*e*2*e) );
t=( (2*a*2*b) + (2*c*2*d) + (2*e*2*f) );
w=( (2*b*2*a) + (2*d*2*c) + (2*f*2*e) );
z=( (2*b*2*b) + (2*d*2*d) + (2*f*2*f) );

c11=( (R2.^2) - (R1.^2) + (X1.^2) - (X2.^2) + (Y1.^2) - (Y2.^2) );
c12=( (R3.^2) - (R2.^2) + (X2.^2) - (X3.^2) + (Y2.^2) - (Y3.^2) );
c13=( (R4.^2) - (R3.^2) + (X3.^2) - (X4.^2) + (Y3.^2) - (Y4.^2) );
C=[c11; c12; c13];

N=[p t; w z];
Q = inv(N);

AT=[2*a 2*c 2*e; 2*b 2*d 2*f];

sln = Q*AT*C;

MULTX=sln(1,1);
MULTY=sln(2,1);
MSM1=['COORDENADA
MULTILARACION:', '(', num2str(MULTX), ', ', num2str(MULTY), ')'];
disp(MSM1)

% COORDENADAS DE LAS ANTENAS
X2=[0,8,0,6];
Y2=[0,0,8,5];

%ANTENA 1
[row,col] = find(RSSIA1 == RSSI1);
[row1,col1]=size(row);
for n=1:1:row1
    CORX=X(row(n,1),col(n,1));
    CORY=Y(row(n,1),col(n,1));
    MENSAJE1=['COORDENADA SEGUN EL RSSI DE LA ANTENA
1:', '(', num2str(CORX), ', ', num2str(CORY), ')'];
    disp(MENSAJE1)
    figure

```

```

        hold on
        plot(X,Y,'k.',CORTX,CORTY,'gp',CORX,CORY,'bo',X2,Y2,'rd')
        grid on
        hold off
        title('Resultados Filtro KNN Etiqueta A Antena 1')
        xlabel('Coordenada X')
        ylabel('Coordenada Y')
    end

%ANTENA 2
    [row,col] = find(RSSIA2 == RSSI2);
    [row3,col3]=size(row);
    for n=1:1:row3
        CORX2=X(row(n,1),col(n,1));
        CORY2=Y(row(n,1),col(n,1));
        MENSAJE2=['COORDENADA SEGUN EL RSSI DE LA ANTENA
2:', '( ',num2str(CORX2), ', ',num2str(CORY2), ') '];
        disp(MENSAJE2)
        figure
        hold on
        plot(X,Y,'k.',CORTX,CORTY,'gp',CORX2,CORY2,'bo',X2,Y2,'rd')
        grid on
        hold off
        title('Resultados Filtro KNN Etiqueta A Antena 2')
        xlabel('Coordenada X')
        ylabel('Coordenada Y')
    end

%ANTENA 3
    [row,col] = find(RSSIA3 == RSSI3);
    [row4,col4]=size(row);
    for n=1:1:row4
        CORX3=X(row(n,1),col(n,1));
        CORY3=Y(row(n,1),col(n,1));
        MENSAJE3=['COORDENADA SEGUN EL RSSI DE LA ANTENA
3:', '( ',num2str(CORX3), ', ',num2str(CORY3), ') '];
        disp(MENSAJE3)
        figure
        hold on
        plot(X,Y,'k.',CORTX,CORTY,'gp',CORX3,CORY3,'bo',X2,Y2,'rd')
        grid on
        hold off
        title('Resultados Filtro KNN Etiqueta A Antena 3')
        xlabel('Coordenada X')
        ylabel('Coordenada Y')
    end

%ANTENA 4

    [row,col] = find(RSSIA4 == RSSI4);
    [row5,col5]=size(row);
    for n=1:1:row5
        CORX4=X(row(n,1),col(n,1));
        CORY4=Y(row(n,1),col(n,1));

```

```
    MENSAJE4=['COORDENADA SEGUN EL RSSI DE LA ANTENA
4:',',',num2str(CORX4),',',',num2str(CORY4),')'];
    disp(MENSAJE4)
    figure
    hold on
    plot(X,Y,'k.',CORTX,CORTY,'gp',CORX4,CORY4,'bo',X2,Y2,'rd')
    grid on
    hold off
    title('Resultados Filtro KNN Etiqueta A Antena 4')
    xlabel('Coordenada X')
    ylabel('Coordenada Y')
end

end
```