



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**TEMA: ANÁLISIS DE LA POSICIÓN Y TIEMPO DE  
DETECCIÓN PARA DISPOSITIVOS MÓVILES EN UN  
SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL EN ESPACIOS  
INTERIORES BASADO EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11  
MEDIANTE LA TÉCNICA FINGERPRINTS Y EL FILTRO DE  
KALMAN, PARA APLICACIONES DE ROBÓTICA  
COOPERATIVA**

**AUTOR: ROMERO MACAS, PAMELA ALEJANDRA**

**DIRECTOR: ING. TRIVIÑO CEPEDA, ROBERTO DANIEL MSc.**

**SANGOLQUÍ**

**2017**



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “ANÁLISIS DE LA POSICIÓN Y TIEMPO DE DETECCIÓN PARA DISPOSITIVOS MÓVILES EN UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL EN ESPACIOS INTERIORES BASADO EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11 MEDIANTE LA TÉCNICA FINGERPRINTS Y EL FILTRO DE KALMAN, PARA APLICACIONES DE ROBÓTICA COOPERATIVA” realizado por la señorita PAMELA ALEJANDRA ROMERO MACAS, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar la señorita PAMELA ALEJANDRA ROMERO MACAS para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 17 de julio del 2017

  
-----  
ING. ROBERTO DANIEL TRIVIÑO CEPEDA  
DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, PAMELA ALEJANDRA ROMERO MACAS, con cédula de identidad N° 1724594153, declaro que este trabajo de titulación “ANÁLISIS DE LA POSICIÓN Y TIEMPO DE DETECCIÓN PARA DISPOSITIVOS MÓVILES EN UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL EN ESPACIOS INTERIORES BASADO EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11 MEDIANTE LA TÉCNICA FINGERPRINTS Y EL FILTRO DE KALMAN, PARA APLICACIONES DE ROBÓTICA COOPERATIVA” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 17 de julio del 2017

A handwritten signature in blue ink is shown within a light blue rectangular box. The signature is cursive and appears to read 'Pamela Romero'. Below the signature box, there is a horizontal dashed line.

PAMELA ALEJANDRA ROMERO MACAS

C.C. 1724594153



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

### AUTORIZACIÓN

Yo, PAMELA ALEJANDRA ROMERO MACAS, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “ANÁLISIS DE LA POSICIÓN Y TIEMPO DE DETECCIÓN PARA DISPOSITIVOS MÓVILES EN UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL EN ESPACIOS INTERIORES BASADO EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11 MEDIANTE LA TÉCNICA FINGERPRINTS Y EL FILTRO DE KALMAN, PARA APLICACIONES DE ROBÓTICA COOPERATIVA” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 17 de julio del 2017

PAMELA ALEJANDRA ROMERO MACAS

C.C. 1724594153

## **DEDICATORIA**

Deseo primeramente dedicar este trabajo a Dios por ser el pilar de mi vida, así como a mi papá y mi mamá, quienes con su sacrificio, esfuerzo y trabajo me permitieron tener una buena formación académica y lograr convertirme en una ingeniera. También dedico este logro a mi hermana quien siempre me ha mostrado su apoyo incondicional.

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios y a la Virgen María por saber guiar mi camino, darme refugio y fuerza en tiempos difíciles y por permitirme cumplir esta gran meta. También agradezco a mis padres Jorge y América por siempre ser mi ejemplo de constancia, responsabilidad y superación, además les doy gracias de todo corazón por cada uno de los sacrificios que han tenido que hacer para que yo pueda alcanzar este logro, por su apoyo y motivación.

De igual manera agradezco a mi querida hermana Andrea, por ser mi mejor amiga, por escucharme, por su apoyo en cada una de mis decisiones y por sus consejos.

Agradezco a mi amado novio Danny Jácome por alegrar mis días, por apoyarme, por escuchar mis problemas, por siempre estar pendiente de mí, en fin por haber hecho que esta etapa universitaria fuera maravillosa.

También agradezco a toda mi familia, tíos, tías, abuelos y abuelas por cada una de sus oraciones para que yo pudiera cumplir este objetivo.

De manera especial quiero agradecer a mi tutor de tesis Ing. Daniel Triviño, a quién respeto y admiro, y a cada uno de mis profesores por haber compartido sus conocimientos y enseñanzas durante estos años.

Finalmente agradezco a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE por haber sido la institución que me abrió sus puertas y me acogió desde el inicio de mi carrera, además por brindarme la oportunidad de enriquecerme con los conocimientos impartidos en las aulas y laboratorios.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN .....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	iii
AUTORIZACIÓN .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT .....	xvi
CAPÍTULO 1 .....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Justificación e importancia.....	3
1.3. Alcance del proyecto.....	5
1.4. Objetivos .....	8
1.4.1. Objetivos general .....	8
1.4.2. Objetivos específicos .....	8
1.5. Descripción General del Proyecto .....	9
CAPÍTULO 2 .....	10
2. MARCO TEÓRICO .....	10
2.1. Estado del Arte de Sistemas de Posicionamiento local .....	10
2.1.1. Sistemas de Posicionamiento para Exteriores .....	10
2.1.2. Tecnologías Inalámbricas para los LPS.....	11
2.1.3. Sistemas de Posicionamiento Local estacionarios en Interiores.....	13
2.1.3.1. Algoritmos de posicionamiento .....	14
2.1.3.1.1. Modelos de Propagación.....	14
2.1.3.1.2. Triangulación .....	15
2.1.3.1.3. Trilateración.....	15
2.1.3.1.4. Fingerprints.....	15
2.1.4. Sistemas de Posicionamiento Local no estacionarios en Interiores.....	18

2.1.4.1.	Filtro de Kalman .....	18
2.1.4.1.1.	Extensiones del Filtro de Kalman .....	21
2.1.5.	Aplicaciones de los Sistemas de posicionamiento local en interiores .....	23
2.2.	Indicador de Potencia de Señal Recibida.....	23
2.3.	Estándar IEEE 802.11 .....	25
CAPÍTULO 3 .....		28
3.	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA .....	28
3.1.	Requerimientos del diseño.....	28
3.1.1.	Hardware.....	28
3.1.2.	Software .....	29
3.1.3.	Escenario de pruebas .....	31
3.1.3.1.	Puntos de prueba.....	32
3.1.3.2.	Puntos de prueba desconocidos (PPD) .....	33
3.2.	Diseño del Hardware del Sistema de posicionamiento local.....	33
3.2.1.	Punto de Acceso.....	34
3.2.1.1.	Configuración de los Puntos de Acceso.....	36
3.2.2.	Tarjeta de desarrollo de Hardware Libre .....	36
3.2.3.	Módulo WiFi.....	38
3.2.3.1.	Caracterización de los módulos ESP8266-01 .....	39
3.2.3.2.	Análisis del tiempo de medición del parámetro RSSI .....	42
3.2.4.	Computador portátil .....	45
3.2.5.	Ubicación de los Puntos de Acceso en el área de pruebas.....	45
3.2.6.	Análisis del parámetro RSSI.....	46
3.2.6.1.	RSSI en función del canal de frecuencia .....	47
3.2.6.2.	RSSI en función de la orientación del módulo WiFi.....	49
3.2.6.3.	RSSI en función de la presencia o ausencia de personas.....	52
3.2.6.4.	RSSI en función de la distancia .....	54
3.2.7.	Diseño del Prototipo del sistema de posicionamiento local .....	56
3.3.	Diseño del Software del Sistema de posicionamiento local .....	57
3.3.1.	Identificación de la posición de los dispositivos móviles.....	57
3.3.2.	Fase de entrenamiento .....	59
3.3.2.1.	Métodos para definir el Rango de posibles valores .....	60

3.3.2.1.1.	Pruebas Realizadas .....	62
3.3.3.	Fase de pruebas.....	65
3.3.3.1.	Definición del número de mediciones para el algoritmo de estimación .....	65
3.3.3.2.	Algoritmos para estimar la posición .....	68
3.3.3.2.1.	Algoritmo 1: Implementación de condiciones.....	69
3.3.3.2.2.	Algoritmo 2: Validación de resultados .....	74
3.3.3.2.3.	Algoritmo 3: Validación de resultados con implementación de condiciones.....	79
3.3.3.2.4.	Análisis de los algoritmos para estimar la posición.....	83
3.3.4.	Procesamiento de datos a través de la implementación del filtro de Kalman .....	84
3.3.4.1.	Parámetros del filtro de Kalman .....	85
3.3.5.	Tiempo de detección de la posición.....	91
3.3.6.	Visualización de datos y posición estimada .....	92
3.4.	Implementación del Sistema de posicionamiento local en interiores .....	93
3.5.	Desarrollo de la Metodología de Pruebas .....	95
3.5.1.	Metodología de pruebas para el Algoritmo 1: Implementación de condiciones.....	96
3.5.2.	Metodología de pruebas para el Algoritmo 2: Validación de resultados.....	96
3.5.3.	Metodología de pruebas para el Algoritmo 3: Validación de resultados con implementación de condiciones .....	97
3.5.4.	Metodología de pruebas para el posicionamiento dinámico del dispositivo móvil.....	98
CAPÍTULO 4.....		100
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	100
4.1.	Pruebas preliminares.....	100
4.1.1.	Hardware.....	100
4.1.1.1.	Prueba inicial .....	100
4.1.1.2.	Prueba de ejecución de los comandos AT .....	101
4.1.2.	Software .....	102

4.1.2.1.	Transmisión de Información.....	102
4.1.2.2.	Tiempo de medición del RSSI.....	104
4.1.2.3.	Tiempo de detección de la posición.....	106
4.2.	Pruebas del Sistema de Posicionamiento Local en interiores.....	107
4.2.1.	Posicionamiento.....	107
4.2.1.1.	Posicionamiento estático .....	107
4.2.1.2.	Posicionamiento dinámico.....	111
4.2.2.	Probabilidad de acierto del posicionamiento.....	114
CAPÍTULO 5.....		117
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	117
5.1.	Conclusiones.....	117
5.2.	Recomendaciones .....	119
5.3.	Trabajos Futuros .....	120
Referencias.....		121

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ecuaciones del Filtro de Kalman .....	20
Tabla 2: Ecuaciones del Filtro de Kalman Extendido (EKF) .....	22
Tabla 3: Diferencias del parámetro RSSI en interiores y exteriores .....	24
Tabla 4: Evolución del estándar IEEE 802.11 .....	26
Tabla 5: Características del estándar IEEE 802.11ac.....	27
Tabla 6: Requisitos Funcionales del Servidor Web .....	29
Tabla 7: Requisitos Funcionales del Servidor de Base de datos .....	30
Tabla 8: Requisitos Funcionales del Algoritmo de ubicación .....	30
Tabla 9: Requisitos No Funcionales del LPS en interiores.....	31
Tabla 10: Características del Punto de Acceso Cisco AIR-AP1142N-A-K9 .....	35
Tabla 11: Configuración de los parámetros de los Puntos de Acceso .....	36
Tabla 12: Especificaciones Técnicas de Arduino DUE .....	37
Tabla 13: Parámetros del módulo ESP8266-01 .....	39
Tabla 14: Función de los pines del módulo ESP8266-01 .....	39
Tabla 15: Configuración de los modos de arranque del módulo ESP8266 – 01.....	40
Tabla 16: Principales Comandos AT .....	41
Tabla 17: Interconexión de pines del módulo WiFi y Arduino DUE .....	57
Tabla 18: Resultados de las pruebas realizadas con las dos base de datos .....	63
Tabla 19: Resultados de las pruebas realizadas con el promedio de 5 mediciones y valores instantáneos.....	66
Tabla 20: Resultados de las pruebas realizadas con el algoritmo de implementación de condiciones.....	71
Tabla 21: Resultados de las pruebas realizadas con el algoritmo validación de resultados .....	78
Tabla 22: Resultados de las pruebas realizadas con el algoritmo de validación de resultados con implementación de condiciones.....	82
Tabla 23: Resultados de cada algoritmo de estimación de la posición .....	83
Tabla 24: Resultados de las pruebas realizadas con diferentes valores de Q.....	89
Tabla 25: Resultados de las pruebas realizadas con y sin el filtro de Kalman.....	115

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Recolección y almacenamiento de información.....	6
Figura 2: Visualización de la ubicación de los dispositivos móviles.....	7
Figura 3: Posicionamiento del dispositivo móvil en el transcurso del tiempo.....	7
Figura 4: Clasificación de LPS en interiores (Pu et al., 2011).....	13
Figura 5: Área de pruebas dividida en cuadrantes .....	32
Figura 6: Designación de puntos de prueba en cada cuadrante .....	32
Figura 7: Designación de puntos de prueba desconocidos para la fase on-line .....	33
Figura 8: Diagrama general del Hardware del sistema de posicionamiento local .....	34
Figura 9: Punto de Acceso CISCO (Cisco, 2015).....	34
Figura 10: Patrón de radiación del AP CISCO (Cisco, 2015) .....	35
Figura 11: Arduino DUE (Arduino, 2017).....	37
Figura 12: Módulo ESP8266 – 01 (Github, s. f.).....	38
Figura 13: Medición del parámetro RSSI .....	43
Figura 14: Diagrama de flujo del Algoritmo de Medición .....	44
Figura 15: Posición de los Puntos de Acceso .....	46
Figura 16: Punto de prueba para el análisis del RSSI .....	47
Figura 17: Variación del RSSI en diferentes e iguales canales para el AP-0 .....	48
Figura 18: Variación del RSSI en diferentes e iguales canales para el AP-1 .....	49
Figura 19: Variación del RSSI en diferentes e iguales canales para el AP-2 .....	49
Figura 20: Variación del RSSI en diferentes direcciones para el AP-0.....	50
Figura 21: Variación del RSSI en diferentes direcciones para el AP-1 .....	51
Figura 22: Variación del RSSI en diferentes direcciones para el AP-2.....	51
Figura 23: Variación del RSSI en presencia y ausencia de personas para el AP- 0.....	52
Figura 24: Variación del RSSI en presencia y ausencia de personas para el AP- 1 .....	53
Figura 25: Variación del RSSI en presencia y ausencia de personas para el AP- 2.....	53
Figura 26: Puntos de prueba para el análisis del RSSI en función de la distancia.....	55
Figura 27: RSSI en función de la distancia para cada AP.....	55
Figura 28: Diagrama de bloques del hardware del LPS.....	56

Figura 29: Diagrama de conexiones del LPS .....	56
Figura 30: Diagrama de bloques del algoritmo del LPS .....	57
Figura 31: Identificación de la posición del objetivo.....	58
Figura 32: Medición del RSSI a lo largo de la distancia para la base de datos .....	59
Figura 33: Elementos del diagrama Boxplot.....	61
Figura 34: Resultados las pruebas realizadas con las dos bases de datos .....	64
Figura 35: Resultados las pruebas realizadas con el promedio de 5 mediciones y valores instantáneos.....	67
Figura 36: Intensidad del RSSI del AP-0 a lo largo del área .....	69
Figura 37: Intensidad del RSSI del AP-1 a lo largo del área .....	69
Figura 38: Intensidad del RSSI del AP-2 a lo largo del área .....	70
Figura 39: División del área de pruebas para el algoritmo 1 .....	71
Figura 40: Diagrama de flujo del algoritmo implementación de condiciones.....	72
Figura 41: Resultados respecto a la PA del algoritmo 1 .....	73
Figura 42: Diagrama de flujo del algoritmo validación de resultados.....	77
Figura 43: Resultados respecto a la PA del algoritmo 2 .....	78
Figura 44: División del área de pruebas en tres secciones.....	80
Figura 45: Diagrama de flujo del algoritmo de validación de resultados con implementación de condiciones .....	81
Figura 46: Resultados respecto a la PA del algoritmo 3 .....	82
Figura 47: Resultados para AP-0 con el Filtro de Kalman variando Q .....	88
Figura 48: Resultados para AP-1 con el Filtro de Kalman variando Q .....	88
Figura 49: Resultados para AP-2 con el Filtro de Kalman variando Q .....	89
Figura 50: Resultados de las pruebas realizadas con diferentes valores de Q .....	91
Figura 51: Visualización de datos y posición estimada del LPS .....	93
Figura 52: Implementación del Sistema de posicionamiento local.....	94
Figura 53: Conexión para la actualización del firmware del módulo ESP8266-01 .....	100
Figura 54: Programa ESP8266_flasher.....	101
Figura 55: Ejecución de comandos AT.....	102
Figura 56: Valores medidos del parámetro RSSI en el monitor serial de Arduino .....	103

Figura 57: Valores medidos del RSSI en la base de datos.....	103
Figura 58: Valores medidos del RSSI en la aplicación Web .....	104
Figura 59: Tiempo de medición del RSSI de un AP.....	104
Figura 60: Tiempo de medición del RSSI de los 3 AP's .....	105
Figura 61: Tiempo de envío de datos al servidor Web .....	106
Figura 62: Tiempo de detección de la posición .....	107
Figura 63: Estimación de la posición con el algoritmo 1.....	108
Figura 64: Estimación de la posición con el algoritmo 2.....	109
Figura 65: Estimación de la posición con el algoritmo 3.....	110
Figura 66: Trayectoria trazada .....	112
Figura 67: Resultados de la estimación del movimiento del objetivo en una trayectoria conformada por 9 puntos.....	113
Figura 68: Resultados de la estimación del movimiento del objetivo en una trayectoria conformada por 5 puntos.....	113
Figura 69: Resultados de las pruebas del LPS con y sin el Filtro de Kalman.....	116

## RESUMEN

Actualmente, las tecnologías móviles para la localización de personas u objetos desempeñan un papel muy importante. Concretamente, GPS alcanza una exactitud considerable en la localización en exteriores, sin embargo posee un bajo desempeño en espacios interiores. Por esta razón se busca una solución fundamentada en el estándar IEEE 802.11 ya que es la red mayormente implementada en espacios cerrados. Esta solución puede basarse en la técnica Fingerprints o en modelos de propagación. Pero debido al complicado modelamiento de la señal RF, en este trabajo se propone una solución usando Fingerprints. Una de las facilidades de esta técnica es la posibilidad de aprovechar la función de la mayoría de los dispositivos móviles para medir el parámetro RSSI de los diversos puntos de acceso de interés. Teniendo en cuenta que el parámetro RSSI sufre muchas variaciones por diferentes aspectos del entorno, se realizó un estudio para determinar cuáles influyen más y tratar de minimizar dichas modificaciones. Además se implementó el filtro de Kalman considerando una relación lineal entre varias mediciones del parámetro RSSI en un mismo punto de prueba para pretender reducir aún más estas variaciones. A pesar de las técnicas usadas, surgió la necesidad de buscar un algoritmo de estimación que permita definir un solo punto para indicar la posición y aumentar la precisión. Finalmente este sistema se implementó para evaluar su rendimiento en cuando a la probabilidad de acierto y el tiempo de detección de la posición.

Palabras claves:

- **SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL EN INTERIORES**
- **FINGERPRINTS**
- **FILTRO DE KALMAN**
- **PARÁMETRO RSSI**
- **PROBABILIDAD DE ACIERTO**

## ABSTRACT

Currently, mobile technologies for locating people or objects play a very important role. Specifically, GPS achieves a considerable accuracy in the outdoor location, however it has a poor performance indoors. For this reason, a solution based on the IEEE 802.11 standard is sought since it is the network mostly implemented indoors. This solution can be based on Fingerprints technique or propagation models. But due to the complicated modeling of the RF signal, a solution using Fingerprints is proposed. One of the facilities of this technique is the possibility to take advantage of the function of most mobile devices to measure the RSSI parameter of the various access points of interest. Taking into account that the RSSI parameter undergoes many variations by different aspects of the environment, a study was carried out to determine which ones influence more and try to minimize such modifications. In addition, the Kalman filter was implemented considering a linear relationship between several measurements of the RSSI parameter at the same test point to try to reduce these variations even further. In spite of the techniques used, the need arose to find an estimation algorithm that allows to define a single point to indicate the position and increase the precision. Finally, this system was implemented to evaluate its performance when the probability of success and the time of detection of the position.

Keywords:

- **LOCAL INDOOR POSITIONING SYSTEM**
- **FINGERPRINTS**
- **KALMAN FILTER**
- **RSSI PARAMETER**
- **PROBABILITY OF SUCCESS**

## CAPÍTULO 1

### 1. INTRODUCCIÓN

#### 1.1. Antecedentes

Actualmente, las tecnologías móviles para la localización y el seguimiento de personas u objetos móviles desempeñan un papel muy importante. Concretamente, usando el sistema de posicionamiento global (GPS) se alcanza una exactitud considerable en la localización en entornos abiertos. Sin embargo, GPS posee un bajo desempeño cuando los dispositivos se encuentran en condiciones de difícil recepción de la señal satelital, por ejemplo en ambientes cerrados, causado por las atenuaciones que sufre la señal debido a muros u otras estructuras y a los multirayectos por señales reflejadas. Pese a esto, existen soluciones que utilizan otros tipos de tecnología para la localización en áreas pequeñas.

Teniendo en cuenta que las personas pasan la mayor parte del tiempo en ambientes cerrados, ya sea por trabajo, estudio o residencia; la localización al interior de instalaciones está cobrando un mayor protagonismo. Esto se materializa en la práctica como una gran oportunidad de negocio, que según un artículo escrito por Francica (2014), “se estima que el mercado mundial de localización en interiores crecerá de \$ 448.6 millones en 2013 a \$ 2.60 mil millones en 2018”.

La localización en entornos cerrados es utilizada para una infinidad de aplicaciones dentro del mercado global, por nombrar algunas, se puede considerar la localización de un producto almacenado en una bodega, la localización de un doctor o un medicamento dentro de un hospital, la localización de una persona dentro de un edificio en llamas o la localización de un perro policía entrenado para encontrar explosivos. Sin embargo para estas aplicaciones, la localización en interiores ha sido uno de los problemas más estudiados, tanto por la comunidad científica como la industria, lo que ha llevado al interés y creación de la Alianza de Localización en Interiores InLocation Alliance (ILA) fundada por la industria móvil (InLocation Alliance, 2017).

La localización en interiores usando el estándar IEEE 802.11 ha llamado la atención, debido a que actualmente son redes ampliamente difundidas, su costo de implementación es bajo, están presentes en la mayoría de dispositivos móviles e infraestructuras y ofrecen la posibilidad de mejorar la precisión en la localización en interiores. Esta solución, generalmente se divide en dos categorías basadas en Fingerprints y en modelos de propagación.

La técnica basada en Fingerprints, primero construye una base de datos que contiene una o varias características de la señal RF con la información de la posición en cada punto del área de interés y luego compara la señal medida, para encontrar la mayor concordancia. Por otro lado el uso de modelos de propagación requiere de un entrenamiento previo del modelo a partir de datos de calibración y luego aplicar trilaterización para estimar la posición.

De acuerdo con Chico (2009), un sistema de posicionamiento local (LPS) en interiores basado en señales RF, presenta las siguientes características:

- No requiere de línea de vista directa (LOS) entre el dispositivo móvil y la estación base.
- Es influenciado por el entorno (multitrayecto, atenuación, etc.) y por interferencias provenientes del mismo u otros sistemas RF.
- No es posible predecir el comportamiento de la señal RF en condiciones reales.
- Puede beneficiarse de infraestructuras presentes en el área de interés.
- Es posible mejorar la precisión con la combinación de medidas provenientes de diferentes señales RF (distinta tecnología o distintos canales).

Usando la metodología Fingerprints para la localización en interiores se han realizado varios proyectos, un ejemplo es presentado por Dobarco (2013) que desarrolla “un sistema capaz de posicionarse en cualquier superficie comercial y guiar al usuario a través del establecimiento permitiéndole así localizar los productos que desee, ahorrándole tiempo en la búsqueda” (p. 3). El algoritmo emplea la medición del

parámetro RSSI, la técnica Fingerprints y los sensores de un smartphone o una Tablet: acelerómetro, giroscopio y magnetómetro.

Para darle un enfoque dinámico a la estimación de la posición de los dispositivos móviles, es necesario además de las técnicas anteriormente mencionadas, procesar la información a través del filtro de Kalman para estimar la posición en cada instante. Este filtro se utiliza para modelos lineales con ruido blanco gaussiano de media nula. Según Dal Lago, Grondona e Incicco (2010) definen a la solución del filtro como recursiva, lo que significa que “cada estimación actualizada del estado se calcula a partir de la estimación anterior y por ende en el arranque va a depender de datos de entrada” (p. 7). Es importante conocer que este filtro se compone de dos conjuntos de ecuaciones, uno para predecir la posición y el otro para corregirla.

El filtro de Kalman es mayormente empleado en sistemas de posicionamiento para ambientes exteriores usando el sistema GPS. Además existen algunas extensiones del filtro de Kalman para trabajar con modelos no lineales, como son: el Filtro de Kalman Extendido (EKF) y el Filtro de Kalman “Unscented” (FKU), que requieren de la linealización previa del modelo.

La empresa francesa Insiteo, desarrollo una aplicación comercial basada en redes inalámbricas (IEEE 802.11 y Bluetooth) y la técnica Fingerprints para determinar la posición de un dispositivo en ambientes interiores. Esta aplicación tuvo gran aceptación, por lo que fue empleada para el desarrollo de servicios innovadores dentro de inmuebles de diferentes sectores comerciales y turísticos.

## **1.2. Justificación e importancia**

Dobarco (2013) y Lin (como se citó en Barba, 2012) han identificado que se puede lograr estimar la posición con una precisión prometedora (aproximadamente 1 metro) en condiciones controladas como en un laboratorio o en áreas pequeñas; en la práctica esto depende del lugar en el cual se implemente la solución. Esta es la razón principal por la cual aún no se han desarrollado sistemas de localización en ambientes interiores

de gran tamaño; por ejemplo, la precisión de la posición en centros comerciales o aeropuertos puede todavía ser de 20 a 30 metros.

Por otro lado, existen múltiples tecnologías que se aplican bajo diferentes condiciones para estimar la posición de un terminal o dispositivo móvil, dependiendo de aspectos como la resolución, cobertura, costo, consumo, escalabilidad y fiabilidad. En otras palabras, no hay una única solución entre los algoritmos y tecnologías de localización existentes.

Resumiendo, la localización en ambientes interiores plantea una serie de retos, por un lado los aspectos tecnológicos, para desarrollar soluciones innovadoras que ofrezcan alta precisión y aplicaciones prácticas en múltiples áreas y diversos mercados; y por otra parte, llevar a cabo la implementación del sistema, ya que no existe una solución global (como GPS o la red móvil del operador) capaz de cubrir todas las áreas de interés manteniendo el costo beneficio.

Este proyecto de investigación, busca determinar la probabilidad de acierto y el tiempo de respuesta de la localización de dispositivos móviles (dispositivos que representan a robots cooperativos) en ambientes controlados mediante el uso de redes WiFi. Para evitar la complejidad inherente de la propagación en ambientes interiores, la predominancia de los multitrayectos (debido a la presencia de caminos sin línea de vista), respuestas atrasadas (debido a la velocidad de desplazamiento y a la velocidad de detección) y por ende errores de gran magnitud, se plantea desarrollar un sistema de posicionamiento local mediante la técnica Fingerprints y una posterior aplicación del Filtro de Kalman corregir las mediciones.

Una de las facilidades de la técnica Fingerprints es la posibilidad de aprovechar la función que tienen la mayoría de los dispositivos móviles para medir fácilmente el Indicador de Intensidad de Señal Recibida (RSSI) de los diversos Puntos de Acceso (AP's) que se encuentran en el entorno y así construir la base de datos que servirá para compararla con las nuevas mediciones de la señal. Por otro lado en la aplicación del Filtro de Kalman, la ventaja más importante es que este filtro se adapta a las

necesidades del problema, ya que funciona tanto para situaciones estáticas como para situaciones dinámicas, y para modelos lineales y no lineales.

El fin y aplicación de este proyecto de investigación será proveer recursos de ubicación en tiempo real a situaciones de uso estacionario, como por ejemplo a proyectos de robótica cooperativa, que es un sistema compuesto de varios robots capaces de resolver problemas conjuntamente, donde es importante conocer la posición de cada uno de ellos.

### **1.3. Alcance del proyecto**

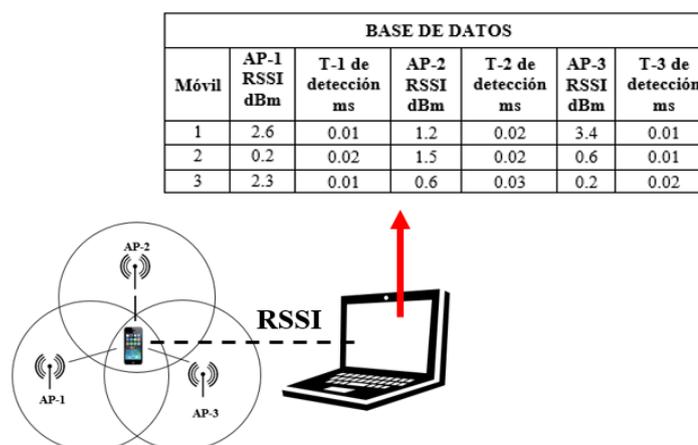
Este proyecto de investigación plantea el desarrollo de un sistema de posicionamiento local (LPS) orientado a ambientes interiores controlados con respuestas en tiempo real usando dispositivos móviles, el estándar IEEE 802.11, la técnica Fingerprints y el Filtro de Kalman.

El LPS pretende estimar la posición referencial en tiempo real de dispositivos móviles mediante la técnica Fingerprints y la medición de la potencia de señal recibida (RSSI) desde distintos Puntos de Acceso (AP), para construir una base de datos de huellas digitales de la señal, y proveer la información en tiempo real de la posición de un dispositivo móvil en un área controlada dentro del Laboratorio de Sistemas Avanzados de Telecomunicaciones, la cual se podrá visualizar en la pantalla de una computadora, a través de un programa o aplicación web desarrollada. Posteriormente se plantea evaluar si la aplicación del procesamiento de las medidas a través del filtro de Kalman puede mejorar los resultados de la estimación de la posición.

Para la implementación del LPS se pretende utilizar dispositivos basados en hardware abierto y Módulos WiFi compatibles con la tarjeta de desarrollo; estos módulos ofrecen usos versátiles ya que mediante el código de programación de estos es posible obtener ciertos parámetros de la conexión inalámbrica establecida, como la potencia de la señal o la intensidad de señal recibida; valores importantes para la investigación. Sin embargo, es necesario realizar la caracterización de los módulos con el fin de tener un mayor conocimiento de sus características funcionales, como el

voltaje de alimentación, versión del protocolo de comunicación, potencia de transmisión y recepción que pueden no estar presentes en el Datasheet y son fundamentales para el correcto funcionamiento de los mismos.

En la Figura 1, se muestra cómo se pretende recolectar los datos del parámetro RSSI, receptado por el dispositivo móvil, para posteriormente almacenarlos en una base de datos en función de lo medido en el área de pruebas.

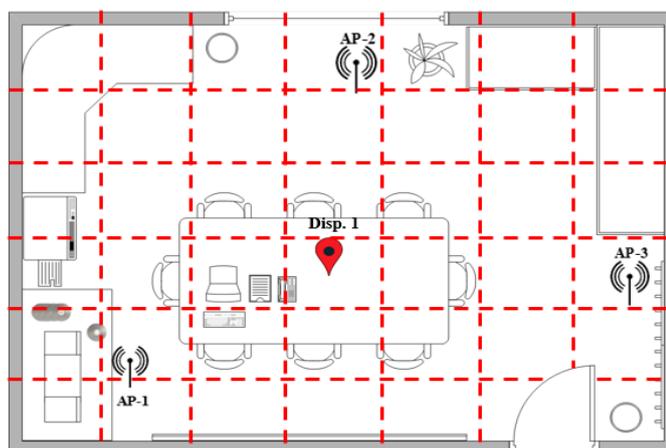


*Figura 1: Recolección y almacenamiento de información*

Por otro lado, el software a desarrollar debe cumplir ciertos requerimientos como: permitir la visualización de la ubicación del dispositivo móvil y estimar el tiempo de detección, todo en función de la información recogida de los parámetros de la señal recibida y las redes WiFi dentro del área controlada para pruebas en tiempo real.

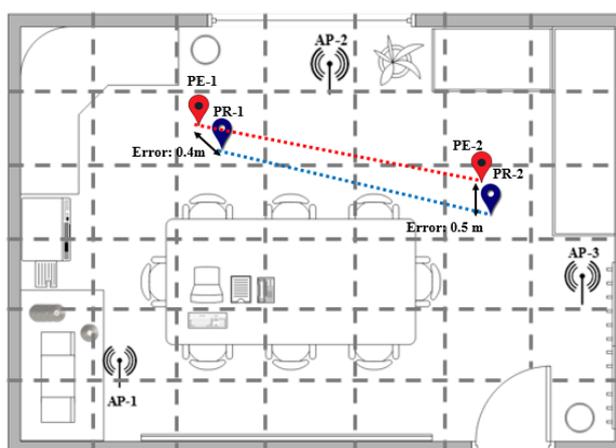
El área controlada para las pruebas, se ubica en el Laboratorio de Sistemas Avanzados de Telecomunicaciones del Departamento de Eléctrica y Electrónica, el cual será dividido virtualmente en 72 secciones de 80 cm, con el fin de tener una matriz de posiciones conocidas e iniciales, dentro de las cuales se moverán los dispositivos y donde se pretende determinar la ubicación. Debido a que la estimación de la posición, puede arrojar datos no tan precisos, es necesario incorporar al software el uso del filtro de Kalman para poder analizar si permite mejorar la estimación de la posición y obtener una solución recursiva con mayor precisión, en función de los datos anteriores. Así se pretende mejorar la probabilidad de acierto de la localización en tiempo real

estacionaria de los dispositivos móviles. En la Figura 2, se indica un prototipo del software, donde se espera visualizar la localización de los dispositivos móviles, indicada con un marcador en este caso.



*Figura 2: Visualización de la ubicación de los dispositivos móviles*

Finalmente se pretende desarrollar un sistema completo que permita estimar la localización de los dispositivos móviles con un error propuesto de 80 cm del lugar real donde se ubica el dispositivo a ser identificado y considerando el menor retardo posible del tiempo de identificación de la posición. En la Figura 3, se indica la posición estimada (PE) y la posición real (PR) del dispositivo móvil, conforme se mueve en el transcurso del tiempo, además del error de estimación.



*Figura 3: Posicionamiento del dispositivo móvil en el transcurso del tiempo*

Para determinar la probabilidad de acierto del LPS en espacios cerrados, será necesario realizar varias pruebas sobre una misma medición. Cada uno de estos aspectos será especificado en los protocolos de pruebas.

Se debe tener en cuenta que se considera como dispositivo móvil a un pequeño o mediano aparato, que dispone de cierta capacidad de procesamiento, conexión permanente o intermitente a una red inalámbrica y posee poca memoria de almacenamiento, por ejemplo, smartphones, laptops, o tarjetas inalámbricas compatibles con Arduino.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivos general**

Analizar la posición estimada y el tiempo de detección de dispositivos móviles para un sistema de posicionamiento local (LPS) en espacios interiores, basado en el estándar IEEE 802.11 mediante la técnica Fingerprints, la medición del parámetro RSSI y el Filtro de Kalman.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Definir el estado del arte y la metodología para el uso de la técnica Fingerprints y Filtro de Kalman.
- Caracterizar las tarjetas WiFi (TX y RX) a utilizarse en los dispositivos móviles (módulos WiFi para la tarjeta desarrollo).
- Realizar mediciones de la potencia de la señal recibida (RSSI) de los dispositivos móviles en el área controlada.
- Diseñar y desarrollar el sistema de posicionamiento local en interiores basado en Fingerprints y el Filtro de Kalman.
- Determinar la posición y el tiempo de detección de los dispositivos móviles para mejorar la localización dentro del área controlada.
- Implementar el diseño en el laboratorio.
- Desarrollar el protocolo de pruebas.

- Evaluar la funcionalidad del sistema integrando Hardware y Software a través de pruebas de campo.
- Determinar la probabilidad de acierto y el tiempo de detección de la posición con o sin el Filtro de Kalman.

### **1.5. Descripción General del Proyecto**

El presente proyecto de investigación tiene como propósito desarrollar un sistema de posicionamiento que permita visualizar en la pantalla de un computador, la posición estimada de un dispositivo móvil dentro de un área controlada en el Laboratorio de Sistemas Avanzados de Telecomunicaciones del Departamento de Eléctrica y Electrónica. Se pretende tener un error de hasta 0.8m.

También se analizará la probabilidad de acierto en los diferentes puntos de prueba, para estimar el rendimiento del sistema. Otro aspecto a considerar es el menor tiempo que se tarda en estimar la posición del dispositivo móvil.

## **CAPÍTULO 2**

### **2. MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Estado del Arte de Sistemas de Posicionamiento local**

Los sistemas inteligentes y las comunicaciones inalámbricas han tenido un gran avance en los últimos años, lo que ha hecho posible el desarrollo de múltiples aplicaciones o servicios, donde es transcendental conocer la posición en tiempo real de un usuario o un dispositivo móvil dentro de un área de interés que puede ser en un entorno cerrado o al aire libre. Se puede requerir tanto que el usuario conozca su propia posición o que la conozca un sistema de administración centralizado.

Un sistema de posicionamiento básico, según Carcavilla (2006) se conforma de varias tecnologías de localización, un medio de comunicación para transmitir y recibir información y software con capacidad de posicionamiento.

##### **2.1.1. Sistemas de Posicionamiento para Exteriores**

El sistema de posicionamiento global (GPS) es ampliamente empleado para la localización en exteriores, el cual utiliza una red de computadores, una constelación de 24 satélites y el principio de triangulación para determinar la posición en función de la altitud, longitud y latitud (Agudo, 2009). Para estimar la posición del objetivo, el receptor GPS debe sincronizar su reloj con al menos tres satélites, de los cuales se conoce su posición exacta, para lograr determinar la distancia del objetivo a cada uno de ellos dependiendo del tiempo de llegada de las señales al receptor y la velocidad de propagación (Dobarco, 2013).

La principal ventaja de GPS para los LPS es que la señal satelital no sufre modificaciones por el efecto multitrayecto. Por otro lado, entre las desventajas de GPS esta su error de estimación, que de acuerdo con Pogge (como se citó en Dobarco, 2013) es de 5 a 10 metros y según Agudo (2009) su precisión es de 8 a 10 metros, por lo que no funciona con exactitud en ambientes interiores debido a que la señal es débil en

presencia de grandes edificios o barreras arquitectónicas. Además requiere de equipamientos más costosos y receptores específicos.

### **2.1.2. Tecnologías Inalámbricas para los LPS**

En ambientes interiores se usa principalmente la tecnología inalámbrica debido a su gran expansión en muchos lugares (como instituciones, casas, oficinas, etc.), por otro lado hoy en día la mayoría de personas tiene a su alcance un dispositivo móvil con conexión inalámbrica, que permite la comunicación sin importar el lugar en donde se encuentren. Los LPS en interiores han sido ampliamente estudiados, debido a sus múltiples beneficios, fácil despliegue, bajo costo de instalación y la gran cantidad de redes inalámbricas ya existentes. Entre las múltiples tecnologías inalámbricas que se pueden usar en entornos cerrados para determinar la posición se encuentran las siguientes: Bluetooth, Zigbee, RFID, WiFi y Redes móviles celulares, cada una será detallada a continuación:

#### *A. Bluetooth*

Esta tecnología pertenece al estándar IEEE 802.15.1, trabaja a una frecuencia de 2.4 GHz y se usa principalmente para conectar diversos dispositivos a un computador sin necesidad de usar cables. La principal desventaja es su bajo alcance, por lo que no ha sido muy usada para sistemas de posicionamiento (Dobarco, 2013).

#### *B. RFID (Radio Frequency Identification)*

RFID es un sistema de identificación mediante señales de radio frecuencia (RF), para el cual se necesita un marcador (tag) que funciona como emisor y un lector para obtener la información almacenada. Para estimar la posición se colocan algunos emisores en posiciones conocidas para medir la intensidad de la señal que reciben los lectores (Chico, 2009). Esta tecnología pretende sustituir a los códigos de barra para evitar el contacto físico, pero no ha logrado la aceptación esperada debido a los altos costos de implementación y a que actualmente no es incluida en los dispositivos móviles (Dobarco, 2013).

### C. Redes móviles

La mayoría de operadoras móviles celulares ofrecen el servicio de Localización GSM, que determina la ubicación de un terminal móvil dependiendo de la celda de cobertura de la radiobase a la que esté conectado. Este método es muy usado para complementar a GPS, aunque su precisión no es exacta y es preferible para ambientes exteriores (Dobarco, 2013).

### D. Zigbee

Zigbee es una tecnología inalámbrica de corto alcance (menor a 50 m) que se basa en el estándar IEEE 802.15.4, opera en las bandas libres de 868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz, además transfiere datos hasta 250 Kbps. Debido a que esta tecnología es compatible con sensores y actuadores, se usa típicamente para aplicaciones domóticas que requieren velocidades de datos y consumo de energía bajos (Dignani, 2011).

### E. WiFi (*Wireless Fidelity*)

WiFi es una red de área local inalámbrica que se define en el estándar IEEE 802.11, cuenta con el mayor despliegue en todo el mundo y permite que los dispositivos móviles se conecten de manera inalámbrica a Internet. Básicamente cuenta con dos equipos: Estaciones móviles (MS) y Puntos de Acceso (AP) (Banerji y Singha, 2013).

Los sistemas de localización basados en redes WiFi comúnmente usan el Identificador de Intensidad de Señal Recibida (RSSI) para que la estación móvil mida la potencia de la señal recibida de los diversos puntos de acceso (AP's) para estimar la posición. Dobarco (2013) señala que las principales ventajas de esta tecnología son:

- El uso de menos infraestructura en comparación con otras tecnologías, por lo que la red se configura rápidamente y a bajo costo.
- La facilidad de añadir varias estaciones móviles cuando se solicite.
- Los dispositivos móviles son fabricados para facilitar la conexión a esta tecnología inalámbrica.

- Trabaja en la banda libre de 2.4 GHz.

La principal desventaja de la señal WiFi es que se ve fuertemente afectada por factores medio ambientales, obstáculos, personas y objetos fijos que se encuentren dentro del área de interés. Esto afecta a las características de la señal y puede conducir a errores en la estimación de la posición.

En este proyecto de investigación se usa esta tecnología inalámbrica debido a las ventajas que presenta y a que ha sido estudiada y utilizada para otros sistemas de posicionamiento.

### 2.1.3. Sistemas de Posicionamiento Local estacionarios en Interiores

Los LPS estacionarios en interiores aunque han sido muy experimentados no han logrado alcanzar una gran precisión como lo hacen los sistemas de posicionamiento en exteriores. Por lo que es muy importante elegir el tipo de LPS en interiores que se ajuste a sus necesidades, dispositivos disponibles, restricciones del ambiente, costos, etc. En la Figura 4, se puede observar una clasificación de estos sistemas.

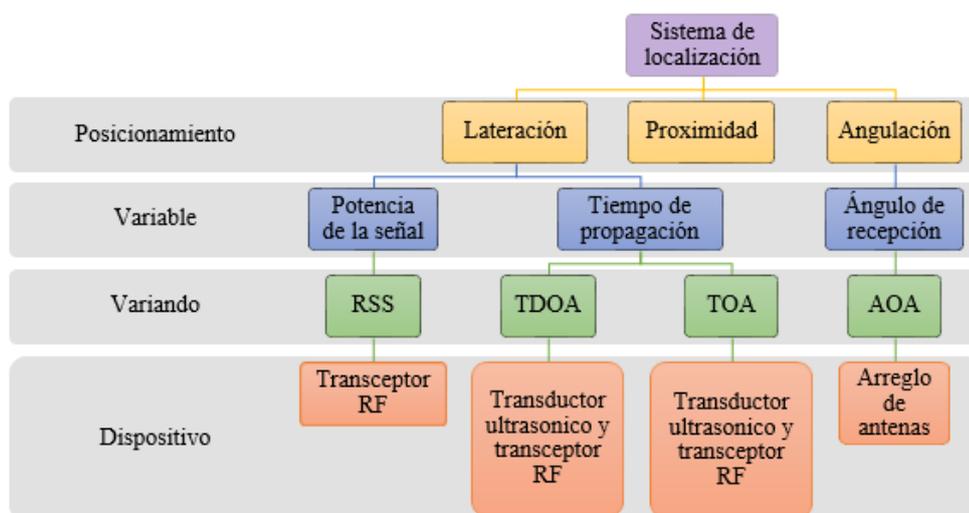


Figura 4: Clasificación de LPS en interiores

Fuente: (Pu et al., 2011)

Los tres métodos principales usados para la localización son: lateración, proximidad y angulación (Pu, Pu y Lee, 2011). El método de proximidad genera una

estimación relativa o aproximada de la posición, mientras que lateración y angulación usan los datos de varios sensores para determinar la ubicación exacta de los dispositivos móviles (Barba, 2012). La lateración utiliza como métrica la distancia entre la estación móvil (MS) con el AP y la angulación utiliza el ángulo de llegada de la señal.

### **2.1.3.1. Algoritmos de posicionamiento**

De acuerdo con Agudo (2009), los algoritmos más usados para determinar la posición de un dispositivo móvil se pueden dividir en dos grupos:

- Empíricos: Requieren información “a priori” sobre variables para determinar la posición.
- De propagación: Determina la posición en base a modelos de propagación de la señal de radiofrecuencia.

#### **2.1.3.1.1. Modelos de Propagación**

La mayoría de proyectos que trabajan con modelos de propagación como algoritmos de posicionamiento, pueden utilizar el modelo de propagación de espacio libre, el modelo de pérdida de ruta simplificado (Simplified Path – Loss Model) o el modelo de pérdida Log-Distance, para poder calcular la distancia entre el dispositivo móvil o sensor y el AP como lo indican Dal lago et al. (2010).

En entornos cerrados, la señal RF sufre muchas variaciones o modificaciones a razón de la atenuación, reflexión, refracción o difracción causadas por obstáculos, presencia o movimiento de personas y a la falta de línea de vista directa (LoS); por lo que aplicar los modelos de propagación para la localización en espacios interiores resulta ser poco viable.

#### **2.1.3.1.2. Triangulación**

Este algoritmo utiliza conceptos geométricos sobre triángulos para poder determinar la distancia al dispositivo móvil; es decir que conociendo los ángulos de llegada de dos señales a los puntos conocidos y la distancia entre ellas, es posible determinar el tercer ángulo y con esto calcular la distancia al punto en cuestión (Dobarco, 2013). La triangulación puede admitir tanto lateración como angulación, además entre las características de las señales que se pueden manejar son: El Tiempo de Llegada (TOA), Ángulo de Llegada (AOA), Tiempo de Retorno de la Señal (ROTF), Diferencia de Tiempo de Llegada (TDOA) o Intensidad de la Señal Recibida (RSS). La principal desventaja según Dobarco (2013), es que la señal puede llegar con un ángulo diferente al real, debido al efecto de refracción que existe en ambientes cerrados, lo que produce errores en el cálculo de la posición.

#### **2.1.3.1.3. Trilateración**

La trilateración al igual que la triangulación utiliza conceptos geométricos, con la diferencia que se necesita conocer tres puntos de referencia y la distancia entre cada uno de ellos para trazar tres circunferencias concéntricas. La posición buscada será la intersección de dichas circunferencias. Otra manera es considerar como la posición buscada al centro del triángulo de menor área, de los que se forman a partir de las diferentes intersecciones de las tres circunferencias (Dobarco, 2013).

#### **2.1.3.1.4. Fingerprints**

La técnica Fingerprints (huellas digitales) es una opción para evitar el complejo modelamiento de la propagación de la señal RF en interiores cuando se trabaja con redes inalámbricas y según Navarro (2010) es una de las técnicas más usadas para fines de localización en ambientes cerrados.

Permite estimar la localización de un dispositivo móvil mediante la comparación de una o varias características de la señal RF respecto a una base de datos recopilada con anterioridad sobre una cierta área de interés. Los parámetros que se pueden usar

para determinar la posición con esta técnica son el ángulo, la potencia o el tiempo, pero la característica comúnmente más usada es la potencia de la señal recibida (RSSI) de los diferentes puntos de acceso (Avallone y Capdehourat, 2010).

El indicador de potencia recibida, RSSI, depende de la distancia del transmisor con el receptor, la cual varía debido a diversas interferencias y al multitrayecto (Chapre, Mohapatra, Jha y Seneviratne, s. f.).

Barba (2012) refiere que las principales ventajas de Fingerprints sobre otras técnicas son:

- Los efectos del multitrayecto y del desvanecimiento son tomados en cuenta, lo que permite obtener mayores niveles de precisión en la localización.
- Todos los dispositivos móviles tienen disponible la lectura del parámetro RSSI.
- No requiere de línea de vista directa (LOS).
- No necesita sincronización entre las entidades emisoras y medidoras.
- No necesita recalibración si el entorno no cambia.

Esta técnica también presenta ciertas desventajas, como son:

- Requiere de una exhaustiva fase de entrenamiento, que puede tomar mucho tiempo y solo será utilizada para un área específica.
- Las mediciones de potencia se ven afectadas por variaciones del entorno (temperatura, obstáculos, presencia o movimiento de personas).

Navarro (2010), sugiere que la técnica Fingerprints modela la relación entre los valores del parámetro RSSI de la base de datos y los valores medidos instantáneamente, de dos maneras:

- Enfoque determinístico: Relaciona directamente los dos valores del parámetro RSSI.

- Enfoque probabilístico: Los valores del parámetro RSSI se relacionan probabilísticamente.

Fingerprints consta de dos fases para su ejecución: fase off-line o de entrenamiento y la fase on-line o de pruebas.

#### *A. Fase off-line o de entrenamiento*

En la fase de entrenamiento, el área de interés es dividida en varios cuadrantes formando una rejilla, en la que para cada punto conocido, se obtiene el valor del parámetro RSSI desde uno o varios puntos de acceso (AP's), formando así una tabla con la información de la posición del punto y el valor del parámetro RSSI medido, que luego se almacenará en una base de datos y generará un mapa (radiomap) del área de pruebas (Pérez, Carrera y Altamirano, s. f.).

La cantidad de puntos seleccionados y el tamaño de los cuadrantes de la rejilla deben ser determinados dependiendo de la extensión del área, el costo de realización y el tiempo de respuesta del sistema para obtener una mejor precisión en las medidas (Barba, 2012).

#### *B. Fase on-line o de pruebas*

En esta fase se obtienen nuevas muestras en tiempo real del parámetro RSSI en puntos de prueba cuya posición se desconoce, para estimarla se compara la nueva medición con los valores del parámetro RSSI de la base de datos creada anteriormente y se la determina de acuerdo a la mayor coincidencia (Dobarco, 2013).

Barba (2012), indica que es necesario el uso de ciertas técnicas para aumentar la exactitud en la estimación de la posición ya que los valores en tiempo real pueden no coincidir con los almacenados en la base de datos.

La técnica Fingerprints es mayormente utilizada para situaciones estáticas, sin embargo, aunque no es parte del estudio vale la pena mencionar que existen otras

técnicas como el filtro de Kalman, que permiten mejorar la precisión de las estimaciones de la posición obtenidas con Fingerprints, cuando los dispositivos se encuentran en movimiento.

#### **2.1.4. Sistemas de Posicionamiento Local no estacionarios en Interiores**

Para analizar la estimación de la posición de un dispositivo móvil, cuando este está en movimiento, es necesario utilizar el filtro de Kalman para tratar de reducir el error cuadrático medio que se produce.

##### **2.1.4.1. Filtro de Kalman**

El Filtro de Kalman desarrollado en 1960 por Rudolf Kalman, es un método matemático empleado para determinar el estado de un sistema dinámico lineal en un entorno con ruido blanco gaussiano de media nula. El filtro representa la estimación de la posición como una función gaussiana y se lo utiliza para sistemas estacionarios y dinámicos (Romero, 2009). Uno de los aspectos más importantes del filtro es que sin conocer la naturaleza del sistema modelado es posible estimar los estados pasados, presentes y futuros.

Los filtros de Kalman han sido extensamente investigados y usados en el área de navegación autónoma o asistida, por ejemplo en sistemas de localización, sobre todo los que trabajan con GPS debido a su alto rendimiento, robustez y fácil implementación. Otra de las principales aplicaciones del filtro de Kalman es la fusión sensorial, que consiste en acoplar las lecturas de diferentes sensores para que la información resultante sea mejor que cuando se consideran los sensores individualmente (Martínez, 2013).

El filtro proporciona una solución recursiva, lo que significa que una nueva estimación del estado del sistema se determinará en función de los datos anteriores (a priori) por lo que para la primera estimación se necesitará tener datos iniciales, que pueden ser definidos a partir de la observación (Dal Lago et al., 2010).

Bianco (2013) asegura en su trabajo especial de grado que los filtros de Kalman son óptimos cuando el modelo coincide con el sistema real, el ruido de entrada es blanco, y la covarianza del ruido es conocida.

Welch y Bishop (2006) indican que las ecuaciones que se utilizan para el desarrollo del filtro de Kalman se dividen en dos grupos:

- Ecuaciones de actualización del tiempo o Predictivas: Sirven para proyectar (en el tiempo) la estimación del estado y la covarianza del error del estado actual, para el siguiente estado.
- Ecuaciones de actualización de la medida o Correctivas: Sirven para incorporar una nueva medición en la estimación a priori para obtener una estimación a posteriori (futura) mejorada.

Bianco (2013) indica que para establecer la formulación del filtro de Kalman se considera un sistema lineal, invariante en el tiempo, discreto y con ruido, como se indica a continuación:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (1)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (2)$$

Donde  $x_k$  representa al vector de estados del modelo,  $u_k$  al vector de entrada de control opcional y  $z_k$  al vector de mediciones. El ruido del proceso y el ruido de las mediciones se representan por las variables aleatorias independientes con distribución de probabilidad normal,  $w_k$  y  $v_k$  respectivamente, para los cuales es necesario conocer sus matrices de covarianza ( $Q_k$  y  $R_k$ ). La matriz  $Q$  define la precisión del modelo del filtro para describir el proceso real y la matriz  $R$  indica que tan confiables son las mediciones reales (Bianco, 2013).

$$p(w) \sim N(0, Q) \quad (3)$$

$$p(v) \sim N(0, R) \quad (4)$$

La matriz  $A$  de la Ecuación 1, relaciona el estado en el instante actual con el estado en el instante anterior en ausencia de una función de entrada de control opcional o ruido del proceso. La matriz  $B$ , de la misma ecuación, relaciona la entrada de control opcional  $u_k$  con el estado  $x_k$  y la matriz  $H$  de la Ecuación 2, relaciona el estado  $x_k$  con la medición  $z_k$ . Las tres matrices mencionadas pueden ser variantes en el tiempo, pero comúnmente son consideradas constantes (Bianco, 2013).

En la Tabla 1 se indican las ecuaciones del filtro de Kalman para las cuales se debe considerar que la estimación del estado a priori es  $\hat{x}_k^-$  y la estimación a posterior es  $\hat{x}_k$  en el instante  $k$ . La covarianza del error estimado a priori es  $P_k^-$  y se la define por:

$$P_k^- = E[e_k^- e_k^{-T}] \quad (5)$$

Siendo:

$$e_k^- = x_k - \hat{x}_k^- \quad (6)$$

**Tabla 1**  
**Ecuaciones del Filtro de Kalman**

<b>Ecuaciones de Predicción</b>	<b>Ecuaciones de Corrección</b>
Proyectar el estado	Calcular la ganancia de Kalman
$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k \quad (7)$	$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (9)$
Proyectar el error de covarianza	Actualizar el estimado vía $z_k$
$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (8)$	$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (10)$
	Actualizar el error de covarianza
	$P_k = (I - K_k H)P_k^- \quad (11)$

Fuente: (Dobarco, 2013)

La matriz  $K$  de la Ecuación 9 representa a la ganancia del filtro de Kalman que reduce al mínimo la covarianza del error a posteriori. Esta ganancia  $K$  indica que si la covarianza del error estimado  $R$  se acerca a 0, el valor medido  $z_k$  es más confiable y

la medición predicha  $H\hat{x}_k^-$  es menos confiable, sucede todo lo contrario si la covarianza del error medido a priori  $P_k^-$  se acerca a 0 (Bianco, 2013).

La correcta selección de los parámetros  $Q$  y  $R$  (de la Ecuación 8 y 9) mejora el desempeño del filtro de Kalman. Los valores de la matriz  $R$  se pueden determinar mediante el cálculo de la varianza y covarianza de los sensores utilizados, si estos valores no causan un buen desempeño es posible ajustarlos de forma manual. Se debe considerar que cuando los valores de la matriz  $R$  son pequeños, el filtro basa su estimación principalmente en las mediciones del sensor y si los valores son grandes, el filtro se basa mayormente en la predicción del modelo. Es más dificultoso determinar la matriz  $Q$  ya que generalmente no es posible observar directamente el proceso a estimar, además este valor determina que tanto toma en cuenta el filtro a la estimación del modelo (Marín, 2011).

#### **2.1.4.1.1. Extensiones del Filtro de Kalman**

Existen casos donde el filtro de Kalman no puede aplicarse ya que el modelo del sistema o de las observaciones es no lineal, para estos casos se crearon algunas extensiones del filtro original, las principales son: el filtro de Kalman Extendido (EKF) y el filtro de Kalman “Unscented” (FKU). Estas extensiones se caracterizan por linealizar el modelo sobre el estado actual estimado y por utilizar funciones diferenciables para relacionar los estados del modelo y las mediciones.

Las extensiones del filtro de Kalman presentan limitaciones, ya que dependen de la correcta linealización del sistema que puede verse afectado al no recibir las muestras de información a tiempo, además requieren de más cálculos lo que implica un mayor tiempo de procesamiento.

EKF es comúnmente usado para aplicaciones SLAM (localización y mapeo simultáneo), donde un robot móvil construye un mapa del entorno mientras estima su localización dentro del mapa construido dinámicamente (Pfister, 2006). EKF logra linealizar la estimación alrededor de la estimación actual usando derivadas parciales de las funciones del proceso y de las mediciones, para lo cual se supone que el proceso está gobernado por una ecuación diferencial estocástica no lineal:

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1}) \quad (12)$$

Y las mediciones se representan por:

$$z_k = h(x_k, v_k) \quad (13)$$

Donde  $f$  (Ecuación 12) relaciona el estado a priori con el estado actual y la función no lineal  $h$  (Ecuación 13) relaciona el estado  $x_k$  con la medición  $z_k$ . En la práctica el ruido  $w_k$  y  $v_k$  son considerados nulos ya que no se conocen sus valores en cada intervalo de tiempo. Con estas consideraciones se establecen las ecuaciones del filtro EKF como se indican en la Tabla 2.

**Tabla 2**  
**Ecuaciones del Filtro de Kalman Extendido (EKF)**

<b>Ecuaciones de Predicción</b>	<b>Ecuaciones de Corrección</b>
Proyectar el estado	Calcular la ganancia de Kalman
$\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}, 0) \quad (14)$	$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + V_k R_k V_k^T)^{-1} \quad (16)$
Proyectar el error de covarianza	Actualizar el estimado vía $z_k$
$P_k^- = A_k P_{k-1} A_k^T + W_k Q_{k-1} W_k^T \quad (15)$	$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - h(\hat{x}_k^-, 0)) \quad (17)$
	Actualizar el error de covarianza
	$P_k = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (18)$

Fuente: (Welch y Bishop, 2006)

El filtro de Kalman “Unscented” (FKU) elimina la linealización que se realiza con EKF y mantiene la estructura de predicción y corrección del filtro original, pero emplea la transformación Unscented (UT) que calcula un conjunto de puntos de muestra para representar de forma más precisa la media y la varianza del estado en lugar de estimar la covarianza del error (Marín, 2011).

Debido al extenso procesamiento que se requiere con las extensiones del filtro de Kalman original, no serán consideradas para el análisis del presente proyecto de investigación.

### **2.1.5. Aplicaciones de los Sistemas de posicionamiento local en interiores**

La necesidad de crear LPS en ambientes interiores surge de la gran aceptación de las aplicaciones móviles en el mercado. Estas aplicaciones requieren conocer con exactitud la posición de un usuario o un objeto, para cumplir las funciones para las cuales fueron creadas. A continuación se señalan algunas de las funciones más comunes:

- Localizar personas o animales que se encuentren atrapados al interior de un edificio durante terremotos, incendios, inundaciones o derrumbes (Dobarco, 2013).
- Crear mapas guiados para aeropuertos, hospitales, centros comerciales o museos, mejorando la experiencia de quien visite estos lugares (Avallone y Capdehourat, 2010).
- Ubicar de forma inmediata a médicos, pacientes o equipos médicos dentro de clínicas u hospitales (Figuera, 2009).
- Guiar personas discapacitadas dentro de las instalaciones de un edificio, una institución o un campus (Figuera, 2009).
- Localizar diversos materiales u objetos dentro de un almacén o para realizar inventarios (Figuera, 2009).
- En casas inteligentes donde el usuario necesita activar una aplicación al entrar a una habitación específica (Carcavilla, 2006).
- En robótica cooperativa, es necesario conocer la posición del robot para saber a qué coordenadas corresponde la información (temperatura, humedad, etc.) que ha sido enviada o para el seguimiento de robots de vigilancia.

### **2.2. Indicador de Potencia de Señal Recibida**

El Indicador de Potencia de Señal Recibida, conocido por sus siglas RSSI, es la potencia, comúnmente en dBm, con la que la señal llega de un punto de acceso (AP) a un dispositivo móvil, ya que siempre incluyen una interfaz de red inalámbrica (IEEE 802.11) que facilita su legibilidad y su conexión a la red inalámbrica (Dobarco, 2013). El valor del parámetro RSSI puede variar de un fabricante a otro, ya que es un valor

opcional, arbitrario y relativo, por lo que en el estándar IEEE 802.11 no se especifica cómo cuantificarlo por lo que el fabricante es quien decide cómo hacerlo (Bardwell, 2002).

Figuera (2009) señala algunas de las funciones del parámetro RSSI definidas en el estándar IEEE 802.11:

- Umbral de canal libre: Indica si el canal está libre o no, para poder transmitir un paquete desde un dispositivo.
- Umbral de roaming: Indica cuando un cliente, que está en roaming, se aleja del AP al que está asociado.

**Tabla 3**  
**Diferencias del parámetro RSSI en interiores y exteriores**

Variable	Exterior	Interior
Modelo de pérdida de trayectoria	Lineal	Depende del multitrayecto y del desvanecimiento
Exactitud	No es necesaria	Tiene gran importancia pero es difícil de conseguir
Espacio	Amplio y no limitado	Pequeño y comúnmente rectangular
Despliegue	Aleatorio	Se puede planificar
Potencia de transmisión	Máxima para mantener la calidad del enlace	Ajustada para evitar interferencias
Mapa	Global	Local

Fuente: (Pu, 2009, citado en Pu et al., 2011)

El parámetro RSSI, al ser un valor de potencia varía dependiendo de la distancia entre el transmisor y receptor, por lo que es una de las medidas más usadas para los sistemas de posicionamiento Fingerprints. Se debe tener en cuenta que el comportamiento del parámetro RSSI no es similar en ambientes exteriores e interiores, estas diferencias se indican en la Tabla 3.

Como se ha mencionado antes, el parámetro RSSI cambia de comportamiento en ambientes interiores en función de las variaciones del entorno y del canal de

comunicación afectando notablemente a la estimación de la posición. Dobarco (2013) encontró que el parámetro RSSI varía cuando:

- Los puntos de acceso (AP's) de los cuales se recibe la señal, trabajan en el mismo canal de frecuencia.
- No existe una relación lineal entre la distancia y el parámetro RSSI.
- Dentro del área de interés, se encuentran presentes una o varias personas.
- En el área de interés, la orientación de las personas presentes cambia.

Figuera (2009) también encontró que la variabilidad en el tiempo del parámetro RSSI depende del período de muestreo y la cantidad de medidas que se recolectan. Además como ya se ha mencionado, el parámetro RSSI es fuertemente afectado por la interferencia multitrayecto ocasionada por los obstáculos u objetos dentro del área de interés, además de la atenuación que sufre la señal por los diferentes materiales de construcción de las estructuras dentro del área.

### **2.3. Estándar IEEE 802.11**

El estándar IEEE 802.11 fue ratificado como el estándar original para redes LAN inalámbricas (WLAN) por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) en 1997 pero es más conocido como WiFi (Wireless Fidelity). Esta red ha sido una de las mayormente implementadas hasta el día de hoy ya que proporciona conectividad a los dispositivos independientemente de su ubicación, mediante el uso de ondas de radio en lugar de cables. La red generalmente consta de un punto de acceso (AP) y algunas estaciones móviles que se conectan al AP central, lo que permite dar cobertura a un área de 50 hasta 100 metros (Banerji y Singha, 2013).

Debido a la fuerte aceptación del estándar se han ido desarrollando varias modificaciones al original para mejorar su rendimiento y aumentar los beneficios que ofrece. Entre las principales enmiendas del estándar tenemos: IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n y IEEE 802.11ac. En la Tabla 4, se realiza una comparación de las características y evolución del estándar original.

**Tabla 4**  
**Evolución del estándar IEEE 802.11**

Parámetros	Estándar				
	IEEE 802.11	IEEE 802.11b	IEEE 802.11a	IEEE 802.11g	IEEE 802.11n
<b>Año de publicación</b>	1997	1999	1999	2003	2009
<b>Banda de frecuencia</b>	2.4 GHz	2.4 GHz	5 GHz	2.4 GHz	2.4 y 5 GHz
<b>Ancho del canal</b>	22 MHz	22 MHz	20 MHz	20 MHz	20 y 40 MHz
<b>Velocidad de datos</b>	2 Mbps	1, 2, 5 y 11 Mbps	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 o 54 Mbps	1, 2, 5.5, 6, 9, 11, 12, 18, 22, 24, 36, 48, 54 Mbps	100, 200 y hasta 600 Mbps
<b>Modulación</b>	BPSK y QPSK	QPSK	BPSK, QPSK, 16 QAM o 64 QAM	BPSK, QPSK, 16 QAM o 64 QAM	BPSK, QPSK, 16 QAM o 64 QAM
<b>Capa física (PHY)</b>	FHSS, DSSS y IR	DSSS	OFDM	OFDM y CCK	MIMO - OFDM
<b>Estándar compatible</b>				802.11b	802.11b/a/g

La tecnología MIMO (múltiples entradas - múltiples salidas) introducida en la enmienda IEEE 802.11n, emplea dos técnicas para mejorar la relación señal a ruido (SNR) en el receptor, estas son:

- Beamforming o formación del haz de transmisión: actúa cuando hay más de una antena de transmisión y la señal enviada es coordinada para mejorarla en el receptor (Meraki, 2011).
- Multiplexación espacial: consiste en que cada señal (conocida como flujo espacial) es enviada al mismo tiempo, desde su propio transmisor siguiendo un camino ligeramente distinto hacia el receptor, debido al espacio que existe entre las antenas y aprovechando el multitrayecto (Meraki, 2011).

### A. IEEE 802.11ac

IEEE 802.11ac es una de las últimas enmienda, publicada en el año 2011. Logra aumentar el rendimiento y mejorar la experiencia que se gozaba con las enmienda anteriores, además es compatible con los estándares IEEE 802.11 a/n. En la Tabla 5, se indican sus características más relevantes.

**Tabla 5**  
**Características del estándar IEEE 802.11ac**

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Banda de frecuencia	5 GHz
Ancho del canal	80 MHz o 160 MHz
Velocidad de datos	500 Mbps (Una estación) y 1 Gbps (múltiples estaciones)
Capa física (PHY)	MU-MIMO, OFDM (hasta 512 subportadoras)
Flujos espaciales	Hasta 8
Modulación	256 QAM
Compatibilidad	802.11 a/n

**Fuente:** (Ward, 2012)

Es oportuno aclarar que MU-MIMO (MIMO multiusuario) permite a un punto de acceso (AP) enviar al mismo tiempo y sobre el mismo espectro de frecuencia, varias tramas a diferentes usuarios (Cisco, 2017).

## CAPÍTULO 3

### 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

#### 3.1. Requerimientos del diseño

Para el desarrollo e implementación del LPS en interiores, es necesario definir los requerimientos de Hardware y Software que permitan realizar la identificación de la posición de un dispositivo móvil en base al parámetro RSSI mediante la técnica Fingerprint y el Filtro de Kalman.

##### 3.1.1. Hardware

Los requerimientos de Hardware mínimos necesarios para el diseño del LPS en interiores son:

- Punto de Acceso (AP), compatible con el estándar IEEE 802.11 b/g/n que permita establecer una red inalámbrica, configurando el Identificador del conjunto de servicios (SSID), el canal (frecuencia de trabajo) y el ancho de banda (en caso de ser dual band); además debe contar con el servicio DHCP activado (protocolo de configuración dinámica de host). Cabe indicar que el número de AP's y su ubicación en el área de pruebas serán claves para el desarrollo de la estimación de la posición y su precisión.
- Módulo o tarjeta WiFi, compatible con el estándar IEEE 802.11 b/g/n, de bajo consumo de corriente, alimentación de 3.3 V o 5 V y debe permitir medir el parámetro RSSI de distintas redes inalámbricas activas. Este elemento representará al dispositivo móvil dentro del proyecto de investigación.
- Tarjeta de Desarrollo de hardware libre, compatible con el módulo WiFi de manera que permita programarlo y obtener la información del parámetro RSSI medido; además debe alimentar eléctricamente al módulo WiFi y a través de este comunicarse con el servidor web y de base de datos.
- Computador portátil, con tarjeta de red inalámbrica, que actúe como Servidor Web y de base de datos, y permita visualizar en su pantalla la estimación de la posición del dispositivo móvil.

### 3.1.2. Software

En gran parte, el buen funcionamiento del LPS en interiores, depende de las herramientas que se escogen para su desarrollo, por lo que es necesario describir los requisitos funcionales (hacen referencia a las funciones o servicios que se proveen) y no funcionales (se refieren al diseño, restricciones o presentación) del sistema. En las Tablas 6, 7 y 8 se especifican los requisitos funcionales del servidor Web, servidor de base de datos y del algoritmo de posicionamiento, respectivamente. En la Tabla 9 se indican los requisitos no funcionales del LPS.

Como se mencionó al inicio de este capítulo, la principal técnica empleada en el presente proyecto de investigación, para estimar la posición de un dispositivo móvil es Fingerprint, la cual consta de la fase de entrenamiento (off-line) y la fase de pruebas (on-line). Además se pretende usar el filtro de Kalman para corregir las mediciones. Todo esto se debe tener en cuenta al momento de definir los requisitos del software.

**Tabla 6**  
**Requisitos Funcionales del Servidor Web**

<b>Función</b>	<b>Descripción</b>
Iniciar página Web	Abre la aplicación Web con un URL específico y la actualiza cada cierto intervalo de tiempo.
Conexión a la base de datos	Permite acceder a la información de las bases de datos.
Recibir y guardar variables	Recibe los valores RSSI medidos y los almacena en el servidor de base de datos con su respectiva posición o tiempo de llegada.
Mostrar variables	Permite visualizar el nombre del AP y su valor RSSI medido.
Representación de la posición	Se visualiza la posición estimada del objetivo a través de puntos indicativos.

**Tabla 7**  
**Requisitos Funcionales del Servidor de Base de datos**

<b>Función</b>	<b>Descripción</b>
Crear bases de datos	Permite crear dos bases de datos independientes, para la fase de entrenamiento y de pruebas.
Base de datos de entrenamiento	Almacena los valores RSSI medidos de los distintos AP's, con su respectiva posición, para la fase de entrenamiento.
Base de datos de pruebas	Almacena los valores RSSI medidos de los AP's de interés y el tiempo en que llegan al servidor.

**Tabla 8**  
**Requisitos Funcionales del Algoritmo de ubicación**

<b>Función</b>	<b>Descripción</b>
Conexión a la red	Conectar el módulo WiFi, el servidor web y de base de datos a la misma red.
Medir el parámetro RSSI	Realizar mediciones del RSSI de los AP's de interés y mostrar los valores en pantalla.
Verificar el RSSI	Si algún RSSI es nulo, realizar nuevamente la medición, pero solo para dicho AP.
Definir variables	Guardar los valores RSSI medidos en diferentes variables.
Enviar datos	Iniciar la conexión con el servidor Web y enviar las variables.
Comparar valores	Buscar coincidencias entre los valores de la base de datos de pruebas con los de la base de datos de entrenamiento.
Filtro de Kalman	Corregir las mediciones del RSSI
Estimar la posición	Procedimiento que permite especificar un solo punto para identificar a la posición buscada.

**Tabla 9**  
**Requisitos No Funcionales del LPS en interiores**

Servidor o Algoritmo	Requisitos no funcionales
Servidor Web	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mostrar el escenario de pruebas.</li> <li>• Representar la posición con puntos de colores llamativos.</li> <li>• Indicar los valores corregidos por el filtro de Kalman</li> <li>• Indicar las coordenadas X e Y de la posición estimada.</li> <li>• La posición del punto será configurada como clave primaria en la base de datos de entrenamiento.</li> </ul>
Servidor de Base de datos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Configurar un identificador para cada conjunto de valores RSSI medidos, en la base de datos de pruebas.</li> </ul>
Algoritmo de posicionamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Debe estimar la posición lo más rápido posible.</li> </ul>

### 3.1.3. Escenario de pruebas

Para la verificación e implementación del LPS en interiores, es necesario disponer de un lugar, donde realizar las pruebas. En este caso se hace uso del Laboratorio de Sistemas Avanzados de Telecomunicaciones del Departamento de Eléctrica y Electrónica, que abarca un espacio de 6 m de ancho y 10.9 m de largo.

Dentro del laboratorio, se ha definido un área de pruebas de 600 cm de ancho y 720 cm de largo, el cual es dividido en una matriz de 8 x 9, con 63 cuadrantes de 80 x 80 cm y 9 cuadrantes de 80 cm de largo y 40 cm de ancho (ubicados hacia la derecha), esto se puede visualizar en la Figura 5. En el área de pruebas se encuentran varias estructuras como: escritorios, sillas metálicas y mesas de madera, que pueden causar interferencias en las mediciones del parámetro RSSI, sin embargo serán consideradas dentro del análisis como parte del medio.

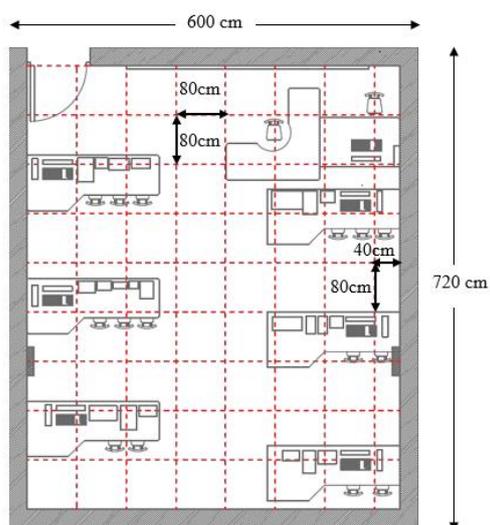


Figura 5: Área de pruebas dividida en cuadrantes

### 3.1.3.1. Puntos de prueba

Dentro del escenario de pruebas, cada vértice y punto central de cada uno de los cuadrantes son considerados como puntos de prueba, por lo que 63 cuadrantes tendrán 5 puntos de prueba cada uno, denominados: A, B, C, D y E; se debe considerar que los 9 cuadrantes restantes, debido a sus dimensiones, solo tendrán tres puntos de pruebas: A, C y E. En la Figura 6, se visualiza esta designación de puntos de prueba.

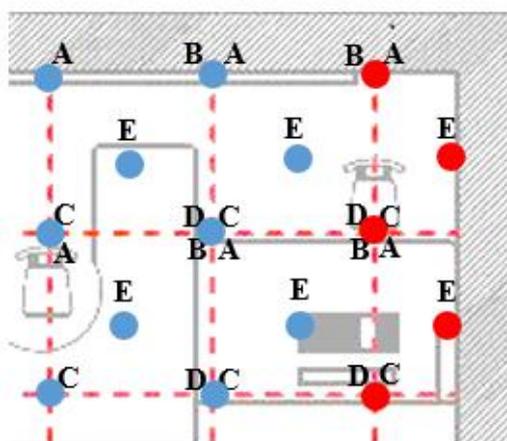


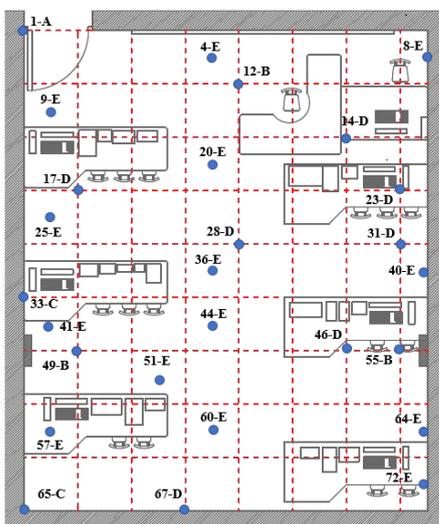
Figura 6: Designación de puntos de prueba en cada cuadrante

El LPS no toma en cuenta puntos repetidos de cuadrante a cuadrante, por lo que resulta un total de 152 puntos de prueba no repetidos. En cada uno de estos puntos, es

donde se realizarán las mediciones del parámetro RSSI de los 3 AP's con el módulo WiFi, esta información junto a la posición de cada punto será almacenada en la base de datos Fingerprints en la fase de entrenamiento.

### 3.1.3.2. Puntos de prueba desconocidos (PPD)

Durante la fase de pruebas del LPS, será necesario realizar nuevas mediciones del parámetro RSSI en ciertos puntos de prueba, donde se supone desconocida la ubicación y se la pretende estimar, por lo que se denominan Puntos de prueba desconocidos (PPD).



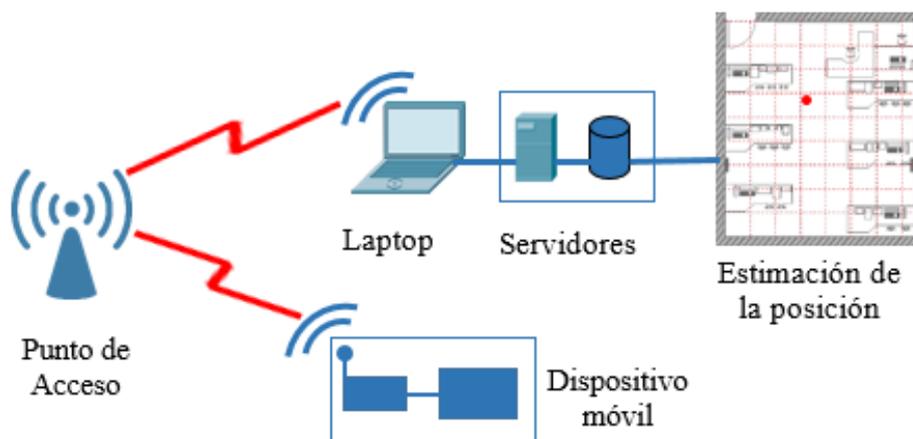
*Figura 7: Designación de puntos de prueba desconocidos para la fase on-line*

Para tener una apreciación clara de cómo funciona el LPS en toda el área de pruebas, se consideran tres puntos por cada fila, ubicados a la derecha, a la izquierda y en la parte central, dando un total de 27 puntos desconocidos (PPD) de análisis, en la Figura 7 es posible visualizarlos.

## 3.2. Diseño del Hardware del Sistema de posicionamiento local

El LPS consta de un AP que configura una red inalámbrica (WiFi), un dispositivo móvil que mide el parámetro RSSI para luego enviarlo a un servidor web y de base de datos contenidos en un computador portátil; para obtener a la salida del sistema la

estimación de la posición, visualizada en la pantalla del computador. La estructura básica del LPS se visualiza en la Figura 8.



*Figura 8: Diagrama general del Hardware del sistema de posicionamiento local*

A continuación se caracterizarán los equipos que se seleccionaron para la implementación del sistema en función de los requerimientos iniciales.

### 3.2.1. Punto de Acceso

Para configurar las redes WiFi, de las cuales se mide el parámetro RSSI en los 152 puntos de prueba, se emplean tres Puntos de Acceso (AP) marca CISCO, modelo AIR-AP1142N-A-K9; que puede ser observado en la Figura 9.



*Figura 9: Punto de Acceso CISCO*

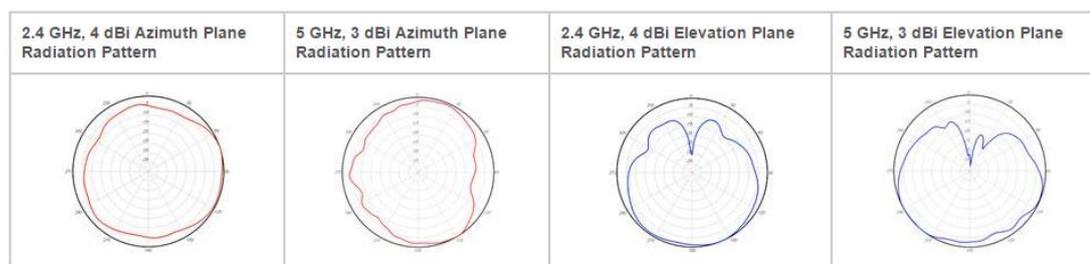
Fuente: (Cisco, 2015)

Las principales características de este equipo AP se mencionan en la Tabla 10 y en la Figura 10 se indica el patrón de radiación para cada banda de frecuencia.

**Tabla 10**  
**Características del Punto de Acceso Cisco AIR-AP1142N-A-K9**

Parámetro	Descripción
Estándar	IEEE 802.11 b/g/n
Características de 802.11n	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MIMO 2 x 3 con dos flujos espaciales.</li> <li>• Formación de haz (beamforming).</li> <li>• Canales de 20 y 40 MHz.</li> <li>• Selección de frecuencia dinámica 802.11 (DFS).</li> </ul>
Velocidad de datos	Hasta 300 Mbps (PHY)
Banda	Dual (2.4 GHz y 5GHz)
Canales no superpuestos	3 canales de 20MHz para 802.11b/g/n
Máxima potencia de transmisión (2.4 GHz)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 802.11b: 20 dBm con 1 antena</li> <li>• 802.11g: 20 dBm con 2 antenas</li> <li>• 802.11n: 20 dBm con 2 antenas</li> </ul>
Antena integrada	Ganancia 4.0 dBi, ancho de haz horizontal 360°.
Interfaces	10/100/1000BASE-T de detección automática Puerto de consola para gestión (RJ45)
Memoria del sistema	128 MB de DRAM 32 MB de flash
Sistema de energía	AC/ Soporta PoE

Fuente: (Cisco, 2015)



*Figura 10: Patrón de radiación del AP CISCO*

Fuente: (Cisco, 2015)

### 3.2.1.1. Configuración de los Puntos de Acceso

Desde la interfaz gráfica de usuario (GUI) propia de CISCO, se configura de manera similar a los 3 AP's (AP-0, AP-1 y AP-2), con diferente SSID por cada red creada, sin olvidar que la dirección MAC es definida por el fabricante. En la Tabla 11 se puede visualizar los parámetros generales de configuración de cada AP.

**Tabla 11**  
**Configuración de los parámetros de los Puntos de Acceso**

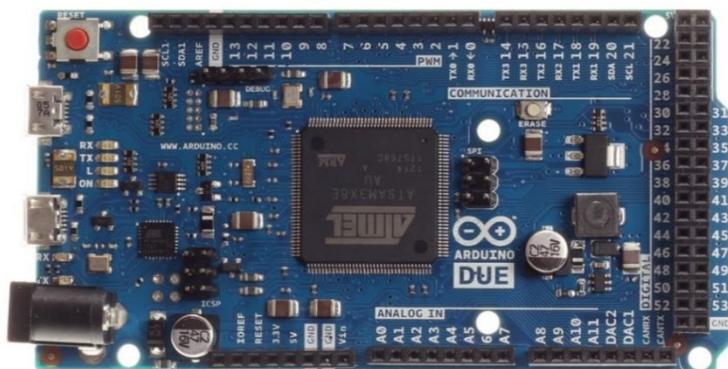
Parámetro	AP-0	AP-1	AP-2
Estándar		IEEE 802.11n	
Banda de trabajo		2.4 GHz	
Potencia de transmisión		Máxima (20 dBm)	
SSID	DEEE_00	DEEE_01	DEEE_02
Dirección MAC	68:BC:0C:A3:C7:70	68:BC:0C:A3:C5:F0	68:BC:0C:C9:87:20
Servicio DHCP		Activado	

Cabe mencionar que el canal de frecuencia de trabajo de cada AP, será analizado y configurado en las posteriores secciones, donde también se especificará la ubicación dentro del área de pruebas de cada AP para evitar el solapamiento o la interferencia entre las ondas de propagación de las diferentes redes inalámbricas activas.

### 3.2.2. Tarjeta de desarrollo de Hardware Libre

La Tarjeta de desarrollo de Hardware Libre escogida para configurar al módulo WiFi es la placa Arduino, debido a que es altamente compatible con los módulos, lo que facilita su control para el desarrollo del LPS. Además Arduino trabaja con los comandos AT, por lo que es posible configurar al módulo WiFi desde el monitor serial del Entorno de Desarrollo Integrado de Arduino (IDE). Por lo que es importante indicar que los comandos AT fueron desarrollados por Dennis Hayes en 1981, por lo que también se conocen como Comandos Hayes, son un conjunto de instrucciones codificadas para configurar módems o terminales y siempre inician con la abreviatura

AT que significa “Atención”. La ITU-T incluyó en el protocolo V.25ter (actual V.250) un conjunto de estos comandos AT (Alegsa, 2016).



*Figura 11: Arduino DUE*

Fuente: (Arduino, 2017)

**Tabla 12**  
**Especificaciones Técnicas de Arduino DUE**

Parámetro	Descripción
Microcontrolador	AT91SAM3X8E
Tensión de funcionamiento	3.3 V
Voltaje de entrada	7-12 V
Pines digitales de E / S	54 (12 proporcionan salida PWM)
Pines de entrada analógicos	12
Pines de salida analógicos	2 (DAC)
Corriente DC en las líneas E / S	130 mA
Corriente DC para pines de 3.3V	800 mA
Corriente DC para pines de 5V	800 mA
Memoria flash	512 KB disponible para las aplicaciones
SRAM	96 KB (dos bancos: 64KB y 32KB)
Velocidad de reloj	84 Hz

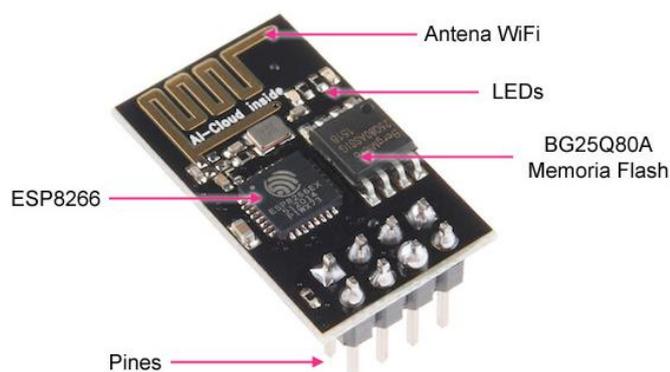
Fuente: (Arduino, 2017)

Se requiere exclusivamente la versión Arduino DUE, visualizada en la Figura 11, ya que de todas las versiones de Arduino, es la única que ofrece el voltaje y corriente suficiente para alimentar eléctricamente al módulo WiFi y garantizar su funcionamiento; ya que otras versiones no entregan la corriente necesaria, y requieren usar una fuente externa, lo que aumentaría el tamaño y peso del circuito.

Principalmente Arduino DUE es empleado para programar las funciones del módulo WiFi, recolectar los valores del parámetro RSSI medidos por el módulo y permitir la comunicación con el servidor Web y la base de datos. Las principales especificaciones técnicas de Arduino DUE se indican en la Tabla 12.

### 3.2.3. Módulo WiFi

El módulo WiFi, representará a los dispositivos móviles en el presente proyecto de investigación, por ello en función de las características técnicas definidas, se ha elegido el modelo ESP8266, que además está siendo utilizado para proyectos de investigación de robótica cooperativa de la Universidad, de donde se desprende este proyecto. Existen algunas versiones del módulo ESP8266, sin embargo se escoge la versión 01, el cual puede ser observado junto a sus elementos en la Figura 12.



*Figura 12: Módulo ESP8266 – 01*

Fuente: (Github, s. f.)

El módulo ESP8266-01 es un potente chip inalámbrico, de bajo costo y tamaño que proporciona la funcionalidad de comunicación inalámbrica (para el estándar IEEE 802.11) a otros sistemas, usando pocos recursos. Es posible configurarlo como AP (host), cliente o AP y cliente al mismo tiempo. Es importante tomar en cuenta que la forma más fácil y rápida de programar estos módulos es a través de comandos AT, por lo que el microcontrolador de la tarjeta de desarrollo deberá manejar dicho comandos (Espressif Systems, 2013). En la Tabla 13, se indican los parámetros más relevantes del módulo ESP8266-01 para su control.

**Tabla 13**  
**Parámetros del módulo ESP8266-01**

Parámetros	Mínimo	Típico	Máximo	Unidad
Voltaje de entrada	1.1		3.3	V
Corriente			12	mA
Frecuencia		2400		MHz

Fuente: (Espressif Systems, 2013)

### 3.2.3.1. Caracterización de los módulos ESP8266-01

La implementación del LPS en interiores se lleva a cabo con el módulo ESP8266-01, por lo que es imprescindible caracterizarlo, conocer su funcionamiento y sus componentes. En la Tabla 14 se indican los 8 pines del módulo WiFi y la función que cumplen.

**Tabla 14**  
**Función de los pines del módulo ESP8266-01**

Pines	Función
VCC	Se encargan de la alimentación eléctrica y funcionamiento del módulo
GND	
RST (reset)	
CH_PD (enable)	
GPIO0	Determinan el modo de arranque del módulo y pueden ser especificados como entradas o salidas
GPIO2	
TX	Programan el módulo y las entradas y salidas seriales
RX	

Instructables (2016) indica que los modos de arranque de ESP8266 – 01 son:

- UART: Programación a través de los pines TX y RX.
- Flash: Arranque desde la interfaz SPI Flash. Se refiere al funcionamiento normal.

En la Tabla 15, se indica la configuración de los pines GPIOs para trabajar en cada uno de los modos de arranque del módulo WiFi ESP8266 – 01.

**Tabla 15**  
**Configuración de los modos de arranque del módulo ESP8266 – 01**

Modo de arranque	GPIO0	GPIO2
Flash	H	H
UART	L	H

Fuente: (Instructables, 2016)

Espressif Systems (2013) define que las principales características del módulo ESP8266 – 01 son:

- Compatibilidad con el estándar IEEE 802.11 b/g/n.
- WiFi Direct (P2P), soft – AP.
- Pila de protocolos integrada TCP/IP.
- Potencia de salida +19.5 dBm con el modo 802.11b.
- Corriente de fuga menor a 10uA.
- Incorpora un procesador (CPU) de 32 bits de baja potencia.
- STBC, MIMO 1 × 1, MIMO 2 × 1.
- Intervalo de guarda de 0.4 μs.
- Consumo de energía en espera menor a 1.0 mW.

Electronut Labs (2014) menciona tres formas de configurar el módulo WiFi ESP8266 – 01:

- La forma más sencilla es usar comandos AT, los cuales son enviados desde el computador al módulo WiFi a través de un adaptador USB a serial. Recomendado para realizar pruebas y configuraciones iniciales.
- Interconectar el módulo ESP8266–01 con Arduino o cualquier otro microcontrolador.
- Programar directamente el módulo, utilizando los pines GPIOs para comunicarse con los sensores, sin necesidad de usar otro microcontrolador.

Para el desarrollo del LPS, se usa un adaptador USB a serial para las configuraciones iniciales y Arduino DUE para programar el resto de funcionalidades

del módulo ESP8266 – 01 a través de comandos AT. En la Tabla 16 se indica la sintaxis de los comandos AT que se usan dentro de la programación del módulo WiFi.

**Tabla 16**  
**Principales Comandos AT**

Comando AT	Descripción	Parámetros
AT	Comprueba si el sistema funciona correctamente	
AT + RST	Resetea el módulo	
AT + GMR	Indica la versión del firmware	
AT + CWMODE = <modo>	Configura el modo de trabajo del módulo	modo: 1: Estación (Cliente) 2: AP (Host) 3: Cliente + AP
AT + CWMODE?	Indica el modo de trabajo	
AT+CIODBAUD?	Indica la velocidad de transmisión de datos	
AT + CWJAP = <ssid>, <pwd>	Conecta el módulo a un AP definido.	Ssid: Nombre del AP Pwd: Contraseña del AP
AT + CWQAP	Desconectar el módulo del AP, al que está actualmente conectado.	
AT+CWLAP	Enlista los AP disponibles	ecn: Seguridad 0: Abierto 1: WEP 2: WPA_PSK 3: WPA2_PSK 4: WPA_WPA2_PSK ssid: Nombre del AP rssi: Intensidad de señal mac: Dirección MAC ch: Canal usado

CONTINÚA →

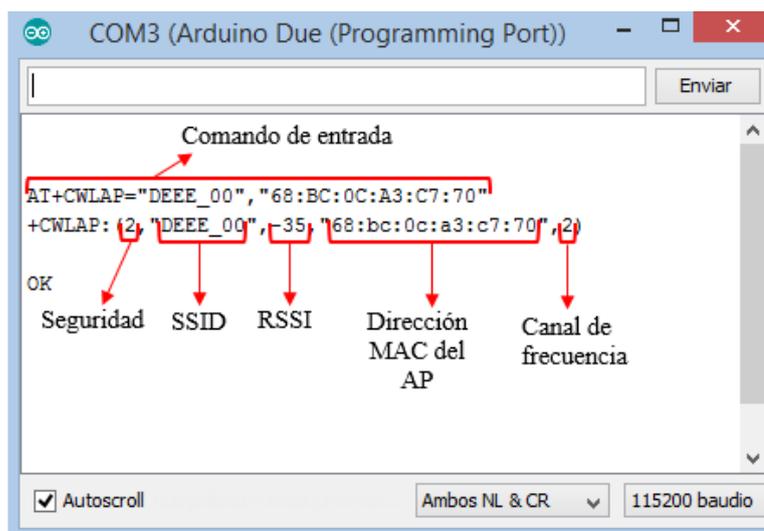
AT+CWLAP = <ssid>, <mac>	Muestra la información del AP específico	ssid: Nombre del AP mac: Dirección MAC del AP
AT + CIPMUX=<mux>	Activa o desactiva el modo multiplex	mux: 0 : Simplex 1 : Multiplex (máx. 4)
AT + CIPSTART = <id>, <type>, <addr>, <port>	Inicia la conexión como cliente. (Simplex o Multiplex)	Id: Identificación de la conexión (0 - 4) type: "TCP" o "UDP" addr: Dirección IP remota port: Puerto remoto
AT + CIPSEND = <id>, <length>	Configura el tamaño de los datos enviados.	id: ID de la conexión length: Longitud de los datos, máximo 2048 bytes
AT + CIPCLOSE = <id>	Cierra la conexión TCP o UDP	id: ID de la conexión

Fuente: (room-15, 2015)

### 3.2.3.2. Análisis del tiempo de medición del parámetro RSSI

El módulo ESP8266-01 muestra la información básica de varias redes inalámbricas activas o de una red inalámbrica en específico, mediante el comando, “AT+CWLAP”, como se indica en la Figura 13. Uno de estos parámetros mostrados es el RSSI, que es la potencia que recibe el módulo WiFi del AP.

Para obtener el valor del parámetro RSSI de un AP es necesario ejecutar el comando especificando el nombre de la red inalámbrica (SSID) y la dirección MAC del AP, “AT+CWLAP=<SSID>, <MAC>”; esto toma alrededor de 5 s para ser visualizado en el monitor serial de Arduino. Al tener 3 AP’s, en total se debe ejecutar tres veces este comando para tener la información del parámetro RSSI de todos los AP’s que se encuentran en el escenario de pruebas (AP-0, AP-1 y AP-2). Posteriormente esta información debe ser procesada por el algoritmo de medición para que pueda ser entendida por Arduino DUE para luego ser enviada al servidor Web. Todo este proceso demora alrededor de 18 s, tiempo que será denominado, Tiempo de medición del RSSI.



*Figura 13: Medición del parámetro RSSI*

Es posible que el Tiempo de medición del RSSI se incremente cuando por alguna razón (interferencia, solapamiento o falla del AP) no sea posible medir el parámetro RSSI de algún AP, lo que implicaría volver a medir alguno de ellos, adicionando 5s más. Es posible realizar tres intentos, hasta obtener una medición del parámetro RSSI de un AP, caso contrario se indica en pantalla que no ha sido posible realizar la medición, por lo que se debe revisar los AP's para tratar de encontrar la causa del problema. En la Figura 14, se indica el diagrama de flujo del algoritmo de medición.

Otro tiempo de relevancia es el de detección de la posición, el cual abarca el Tiempo de medición del RSSI y el tiempo que se demora el algoritmo de estimación en determinar la posición buscada. Este tiempo será determinado más adelante.

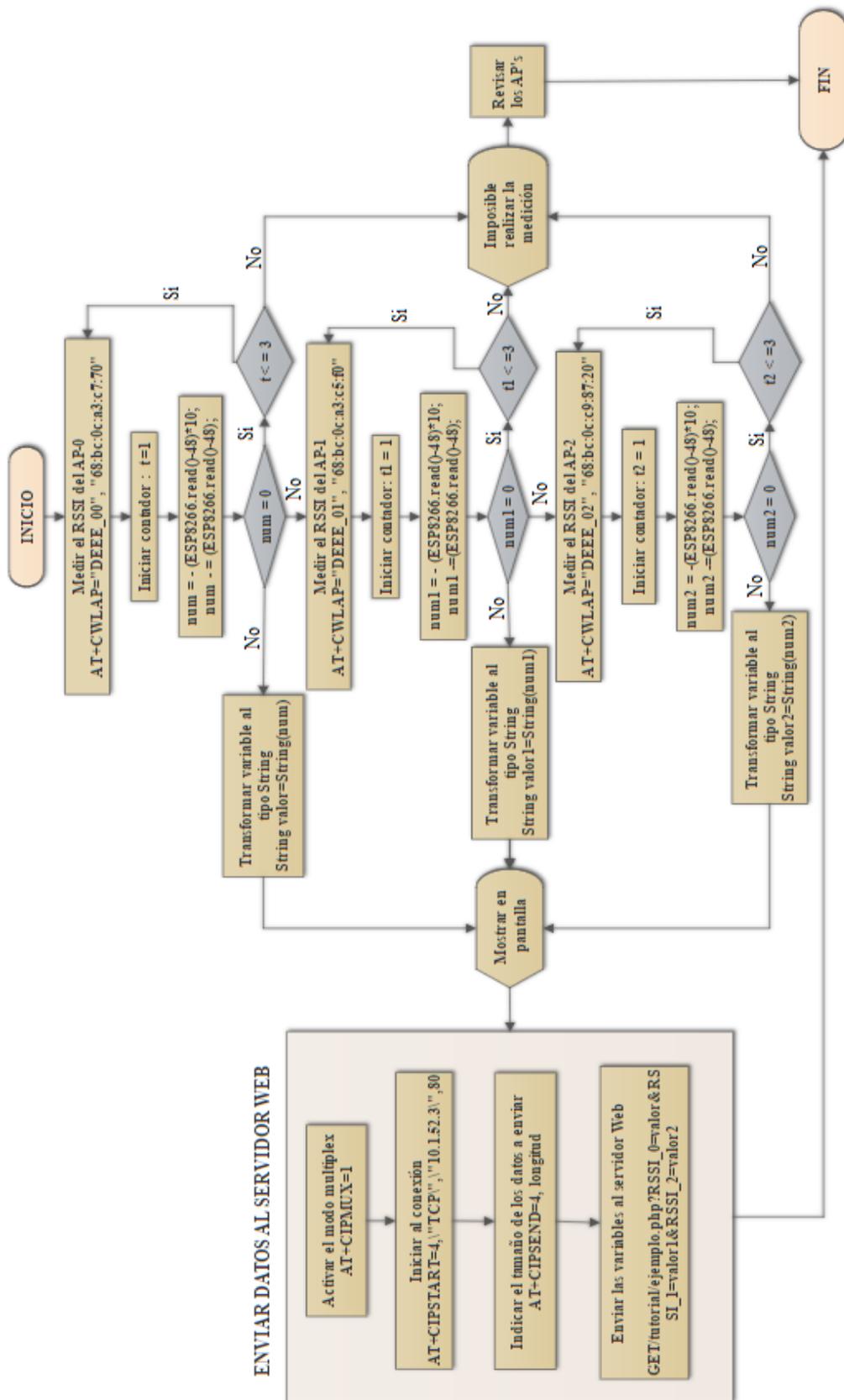


Figura 14: Diagrama de flujo del Algoritmo de Medición

### **3.2.4. Computador portátil**

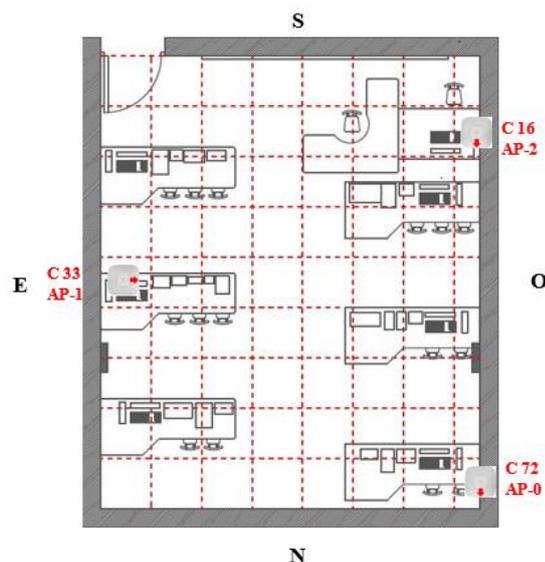
Para el desarrollo del LPS y procesamiento de los datos medidos por el módulo WiFi se hace uso de un computador portátil marca DELL modelo Inspiron 14 Series 5000, con sistema operativo Windows 8.1 de 64 bits a 2GHz, procesador Intel Core i7 de cuarta generación y 8 GB de memoria RAM (DELL Inc., 2014). Este equipo cuenta con los requerimientos de Hardware y el Software necesario instalado para el desarrollo del LPS en espacios interiores.

Las funciones principales del computador son: gestionar el LPS, conectarse inalámbricamente a cualquiera de las redes WiFi de los AP's, alimentar eléctricamente a la tarjeta de desarrollo, configurar los módulos WiFi, contener al servidor Web y de base de datos y permitir visualizar en su pantalla la posición estimada del dispositivo móvil.

### **3.2.5. Ubicación de los Puntos de Acceso en el área de pruebas**

En la revisión bibliografía se encontraron autores como Carcavilla (2006) y Dobarco (2013) que utilizan 4 AP's ubicados en los vértices del área de prueba o Avallone y Capdehourat (2010) que emplean hasta 6 AP's, ya que el área donde funciona el sistema de posicionamiento abarca varias oficinas o varios pisos de un edificio. Otros autores como Dal Lago et al. (2010), Mahamud y Chowdhury (2015), y Figuera (2009), usan 3 AP's ubicados en forma triangular dentro del área de pruebas para lograr una correcta estimación de la posición y evitar el solapamiento entre las redes.

Debido a que el área de pruebas del presente proyecto de investigación no es extensa, se utilizan 3 AP's ubicados en forma triangular. De acuerdo al escenario de pruebas, los 3 Puntos de Acceso, AP-0, AP-1 y AP-2 se ubican en el centro de los cuadrantes 72, 33 y 16 respectivamente, para lograr la forma triangular recomendada por los autores Dal Lago et al. (2010), Mahamud y Chowdhury (2015), y Figuera (2009).



*Figura 15: Posición de los Puntos de Acceso*

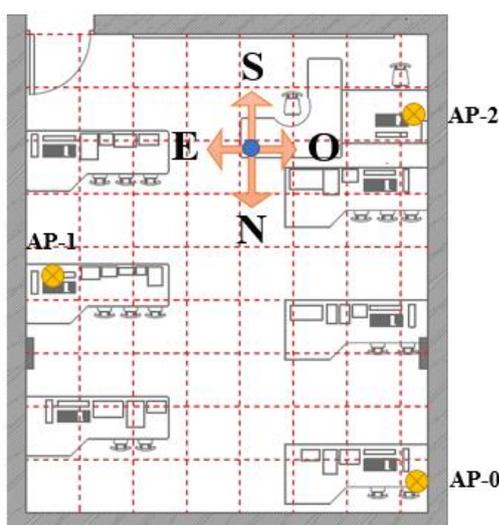
Otro aspecto importante a tomar en cuenta es la orientación de cada AP, para alcanzar la mayor cobertura posible del área de pruebas. De acuerdo a esto, se usa el punto guía de cada AP (ver Figura 9), como referencia para indicar la orientación. Por lo que se ha convenido que el AP-0 este orientado hacia el Norte, AP-1 hacia el Oeste y AP-2 hacia el Este. En la Figura 15, es posible visualizar la ubicación y orientación de cada AP (indicada por el punto guía).

### **3.2.6. Análisis del parámetro RSSI**

Como se ha mencionado anteriormente el parámetro RSSI podría variar debido al canal de comunicaciones, obstáculos, personas presentes, interferencias, etc., perjudicando a la precisión de la estimación de la posición del dispositivo móvil. En la revisión bibliográfica se encontraron algunos aspectos que influyen en las variaciones del parámetro RSSI. Dobarco (2013) realiza un estudio del impacto del canal de frecuencia, la presencia y orientación de personas, y la distancia, sobre el parámetro RSSI. Navarro (2010) y Oguchi, Maruta y Hanawa (2014), analizan la influencia de la presencia o ausencia de personas en el área de pruebas sobre la potencia RSSI y Chapre et al. (s. f.), muestran la influencia de la orientación del hardware, la distancia entre transmisor y receptor, el canal de frecuencia, la presencia

o ausencia de personas, así como la orientación y movilidad de los mismos, sobre el parámetro RSSI.

Para el presente proyecto de investigación se analizan los aspectos considerados más importantes para el LPS en interiores, como son el canal de frecuencia, la orientación del módulo WiFi, la distancia y la presencia o ausencia de personas en el área de pruebas. El objetivo es incluir estos resultados en la implementación del sistema en desarrollo para tratar de reducir las modificaciones del parámetro RSSI.



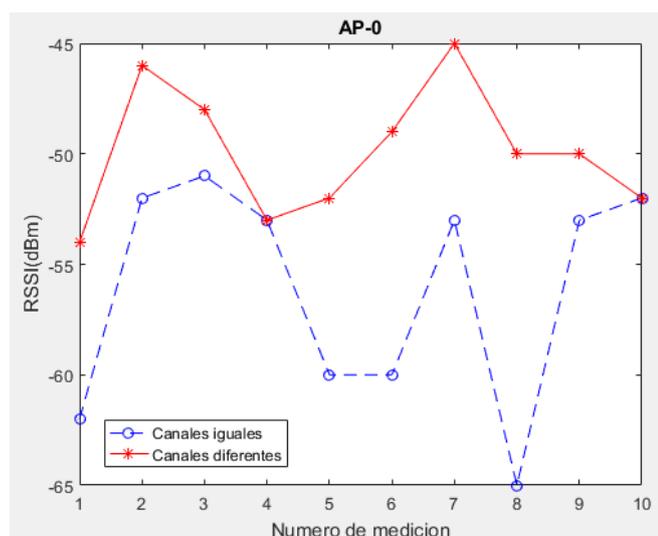
*Figura 16: Punto de prueba para el análisis del RSSI*

Se considera que 10 mediciones del parámetro RSSI, para cada AP, realizadas en alrededor de 180 s son suficientes para conocer el comportamiento y variaciones del parámetro RSSI. Por lo tanto para las siguientes pruebas se realizaron 10 mediciones para cada AP, en el mismo punto de prueba, el cual puede ser visualizado en la Figura 16, donde se indican además las orientaciones respecto a dicho punto y que tan cercano esta de los diferentes AP's.

### **3.2.6.1. RSSI en función del canal de frecuencia**

Para analizar si el parámetro RSSI sufre variaciones cuando los Puntos de Acceso, desde los cuales se envía la señal inalámbrica, están en el mismo o en distinto canal de frecuencia, se han configurado los 3 AP's en el canal 11 (2462 MHz), por ser el más

comúnmente usado y por ende el más congestionado. Posteriormente se configura el AP-0, AP-1 y AP-2 en el canal 2 (2417 MHz), 8 (2447 MHz) y 5 (2432 MHz) respectivamente. En cada caso se realizaron 10 mediciones del parámetro RSSI para cada uno de los AP's en el mismo punto. Los contrastes de estos resultados se visualizan en la Figura 17, 18 y 19 para cada AP.



*Figura 17: Variación del RSSI en diferentes e iguales canales para el AP-0*

Los resultados muestran que las variaciones del parámetro RSSI son menores cuando los AP's trabajan en diferentes canales de frecuencia, como se observa en las Figuras 17 y 18, tanto para el AP-0 y AP1 (AP's más alejados del punto de prueba). Por el contrario el parámetro RSSI medido del AP-2 sufre mayores variaciones al trabajar los AP's en diferentes canales de frecuencia, como se visualiza en la Figura 19; esto podría ser a consecuencia de la cercanía del AP-2 al punto de prueba.

Del análisis, se concluye que si influye el canal de frecuencia en que se encuentren trabajando los puntos de acceso, como también lo indican Dobarco (2013) y Chapre et al. (s. f.); por lo que los AP's se deben configurar en diferentes canales de frecuencia para evitar que existan mayores variaciones del parámetro RSSI, semejando el comportamiento real de los equipos con selección de frecuencia dinámica. Todo esto comprueba la influencia negativa al usar el mismo canal de frecuencia y valida el uso de diferentes canales para cada AP, con el fin de evitar la interferencia co-canal.

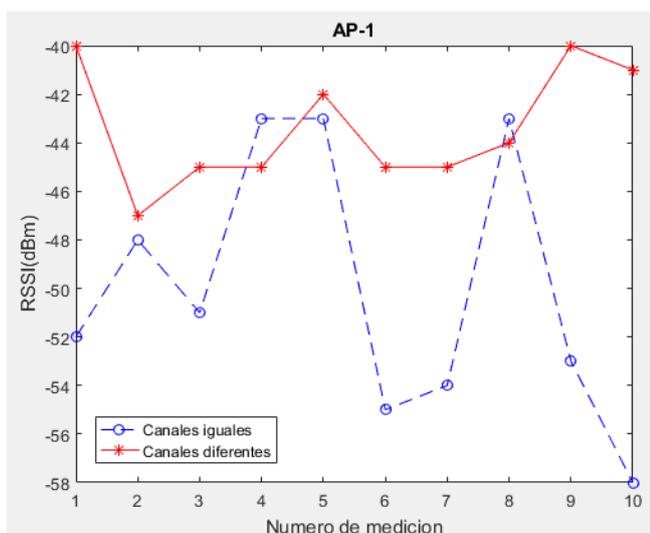


Figura 18: Variación del RSSI en diferentes e iguales canales para el AP-1

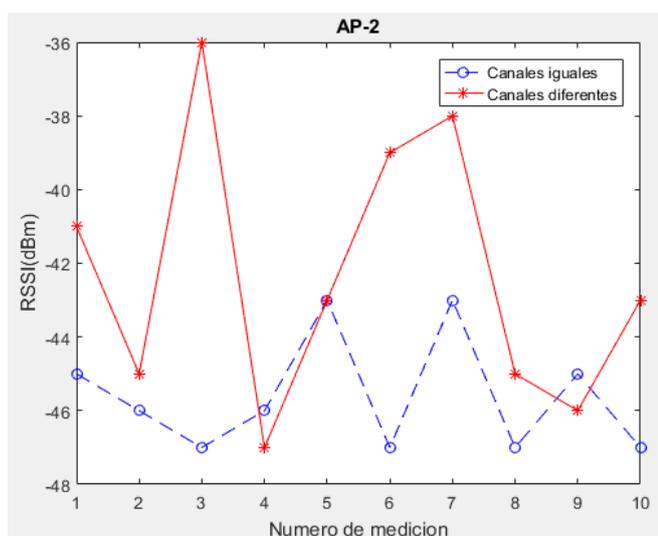


Figura 19: Variación del RSSI en diferentes e iguales canales para el AP-2

Por lo tanto, los AP's deben ser configurados de la siguiente manera: AP-0 en el canal 2 (2417 MHz), AP-1 en el canal 8 (2447 MHz) y AP-2 en el canal 5 (2432 MHz); para evitar la interferencia co-canal ya que alrededor del escenario de pruebas existen otras redes inalámbricas trabajando en los canales 1, 6 y 11.

### 3.2.6.2. RSSI en función de la orientación del módulo WiFi

La orientación del módulo WiFi se refiere a la direccionalidad de la antena del dispositivo móvil a cada uno de los AP's, desde donde se transmite la señal WiFi, ya

que el dispositivo móvil (por ejemplo un robot móvil) podría tener cualquier orientación dentro del área de pruebas. Por lo cual, si el módulo WiFi por ejemplo está ubicado en el punto de prueba de la Figura 16 y su antena está orientada hacia el Norte (N), el módulo estará direccionado al AP-0 y AP-1, si la antena esta hacia el Sur (S) no se direcciona hacia ningún AP, hacia el Este (E) se direcciona al AP-1 y hacia el Oeste (O) al AP-0 y mayormente al AP-2.

Como se mencionó anteriormente, una investigación similar fue realizada por Chapre et al. (s. f.), cambiando de orientación a una laptop, para investigar el efecto de la direccionalidad de la tarjeta inalámbrica.

Para conocer si la orientación del módulo WiFi interfiere en la medición del parámetro RSSI, se realizaron 10 mediciones en el mismo punto para cada uno de los AP's, modificando únicamente la orientación (Norte, Sur, Este y Oeste) de la antena del módulo. Considerando los resultados anteriores, se ha configurado los 3 AP's en diferentes canales de frecuencia. Estos resultados se indican en las Figuras 20, 21 y 22, para el AP-0, AP-1 y AP-2 respectivamente.

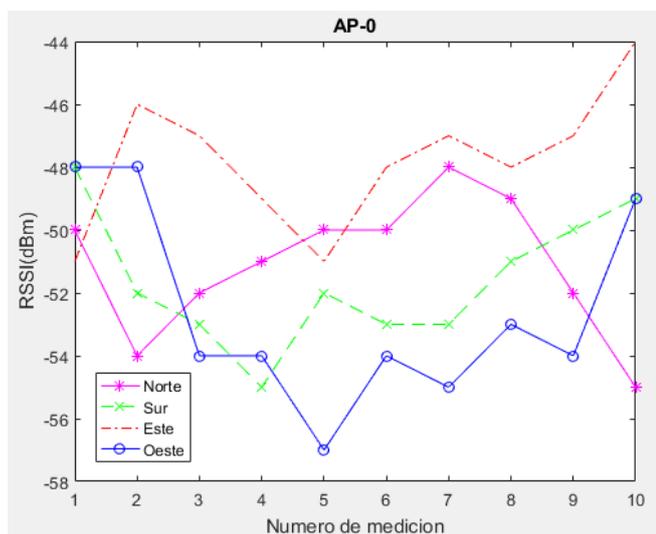


Figura 20: Variación del RSSI en diferentes direcciones para el AP-0

Los resultados de las Figuras 20 y 21, demuestran que el comportamiento del parámetro RSSI medido del AP-0 y AP-1 (AP's más lejanos al punto de prueba) no es

similar al cambiar de orientación al módulo WiFi, ya que en cada orientación, la antena del módulo se direcciona a diferentes AP's. En el caso del AP-2, se observa en la Figura 22, que el comportamiento del parámetro RSSI tienen una tendencia similar en todas las direcciones, además que no se visualizan grandes variaciones del parámetro RSSI como en los casos anteriores, esto podría deberse a la cercanía del punto de prueba al AP-2.

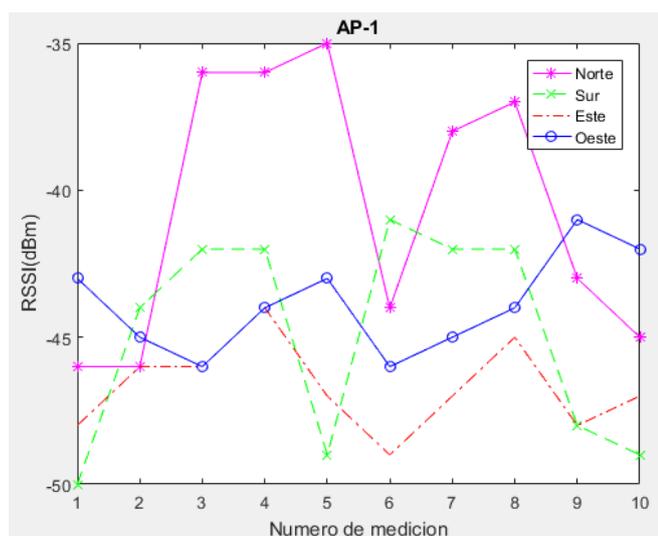


Figura 21: Variación del RSSI en diferentes direcciones para el AP-1

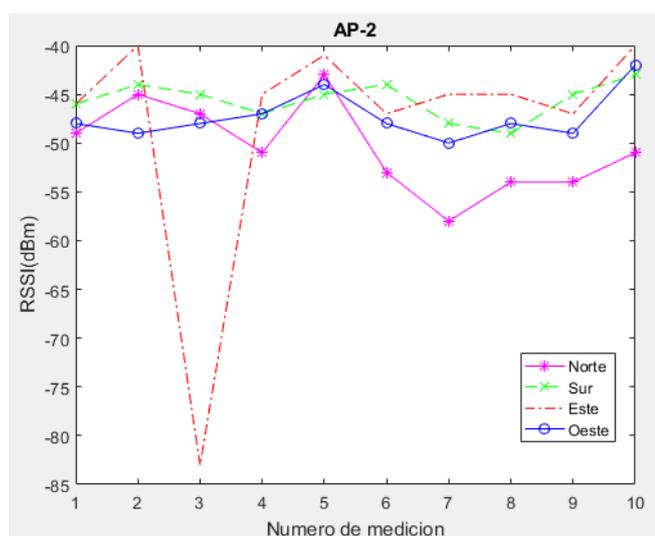


Figura 22: Variación del RSSI en diferentes direcciones para el AP-2

Del análisis se concluye que el cambio de orientación del módulo WiFi influye negativamente en el parámetro RSSI, estos resultados concuerdan con los obtenidos por Chapre et al. (s. f.). Por esta razón para este proyecto de investigación se usará la misma orientación (Este) de la antena del módulo WiFi, que mide el parámetro RSSI, tanto para obtener los valores que se almacenan en la base de datos como para realizar las pruebas en la fase on-line, con el fin de garantizar menores variaciones entre las mediciones manteniendo una sola orientación.

### 3.2.6.3. RSSI en función de la presencia o ausencia de personas

La presencia o ausencia de personas dentro del escenario de pruebas, es uno de los aspectos investigados por Dobarco (2013) y Chapre et al. (s. f.), ya que aseguran que el cuerpo humano absorbe las señales de radiofrecuencia. Para comprobar estas aseveraciones, se realizaron 10 mediciones del parámetro RSSI para cada uno de los AP's en el mismo punto, cuando el laboratorio se encuentra vacío y cuando hay tres personas presentes dentro del área de pruebas. Se debe tener en cuenta, que aunque el laboratorio se considere vacío, siempre va a existir una persona que gestione el sistema. Tomando en cuenta los resultados anteriores, se han configurado los 3 AP's en diferentes canales de frecuencia y se ha mantenido constante la orientación del módulo WiFi. Los resultados de este análisis se observan en las Figuras 23, 24 y 25.

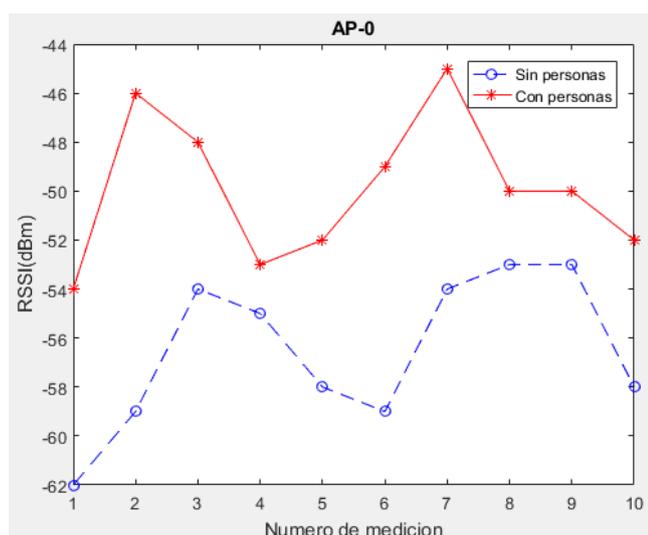


Figura 23: Variación del RSSI en presencia y ausencia de personas para el AP-0

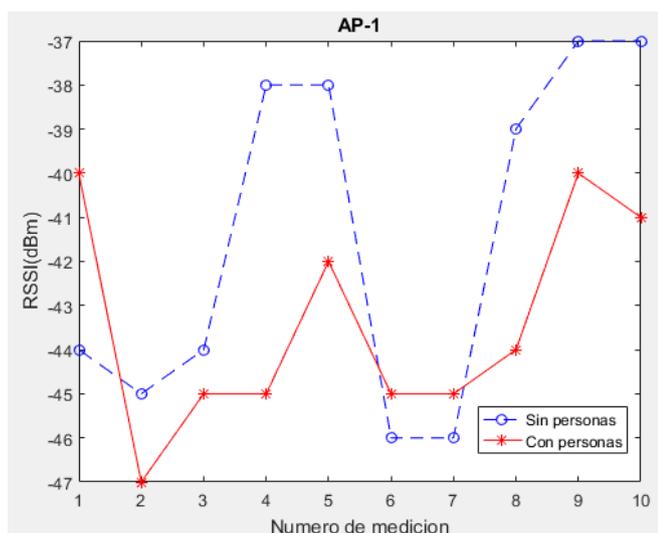


Figura 24: Variación del RSSI en presencia y ausencia de personas para el AP-1

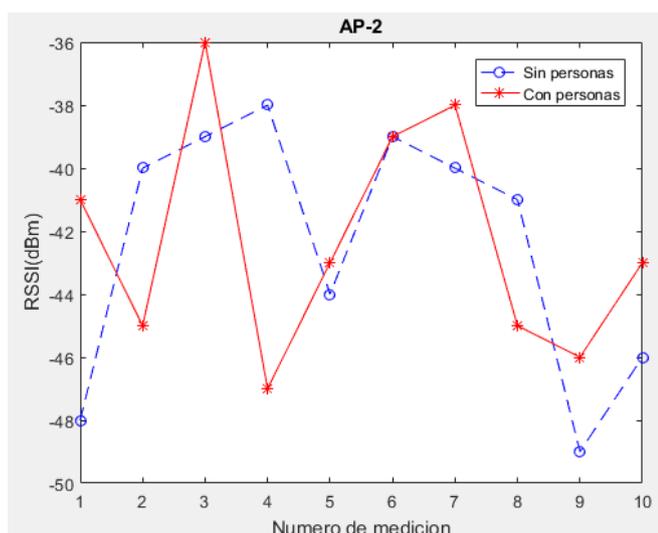


Figura 25: Variación del RSSI en presencia y ausencia de personas para el AP-2

Los resultados indican que en presencia o ausencia de personas, dentro del área de pruebas en un mismo punto, el parámetro RSSI no tiene un valor constante o una tendencia a estabilizarse y por el contrario sufre varias modificaciones, por lo que el comportamiento del parámetro RSSI no es el mismo en ambos casos, como se visualiza en las Figuras 23, 24 y 25. Estos resultados difieren a los expuestos por Dobarco (2013) y Chapre et al. (s. f.), ya que aseguran que el comportamiento del parámetro RSSI en ausencia de personas, a lo largo del tiempo (300 s a 3 días) se estabiliza.

Del análisis se concluye, que es necesario acordar si durante las mediciones para la fase de entrenamiento y de pruebas van a estar presentes personas o no, para asegurarse que el comportamiento del parámetro RSSI sea el mismo durante toda la ejecución del LPS.

Cabe mencionar que es preferible ejecutar el sistema, cuando no existen personas presentes en el área de pruebas, a excepción de quien lo gestiona; ya que si se trabaja con personas presentes, se debe considerar tanto la movilidad como la orientación de cada una de ellas, lo que resultaría ser más complicado. Por esta razón, se acuerda que la única persona que puede permanecer en el área de pruebas durante la ejecución del LPS, es el investigador, quien lo gestiona.

#### **3.2.6.4. RSSI en función de la distancia**

El RSSI al ser un parámetro de potencia, depende directamente de la distancia entre el módulo WiFi (que mide la potencia) y el respectivo AP, por lo que se podría creer que la relación entre ambos es lineal e inversa, es decir que a medida que el módulo se aleja del AP, la potencia recibida disminuye debido a la atenuación del medio de propagación (Dobarco, 2013).

Para este análisis se consideraron como puntos de prueba, aquellos que se encuentran separados del respectivo AP por un intervalo de distancia de 0.8m en forma horizontal, como se indica en la Figura 26. Para lo cual se calculó el valor medio de 10 mediciones del parámetro RSSI en cada punto de prueba para cada AP, las mediciones fueron realizadas durante diferentes días de la semana.

Tomando en cuenta los resultados anteriores, durante las mediciones, en el área de pruebas solo se encuentra la persona que gestiona el sistema, se mantiene constante la orientación del módulo WiFi y los puntos de acceso se configuran en diferentes canales de frecuencia. Los resultados de este análisis se indican en la Figura 27.

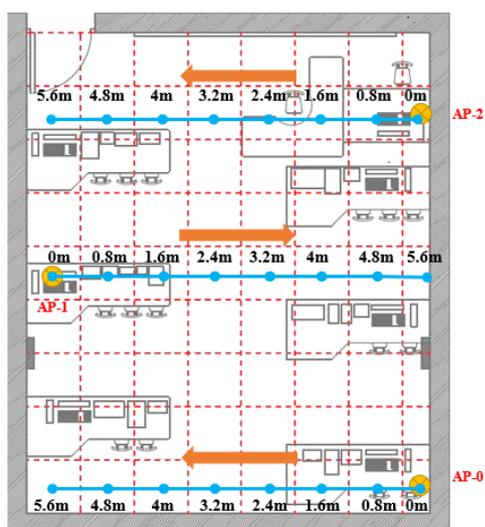


Figura 26: Puntos de prueba para el análisis del RSSI en función de la distancia

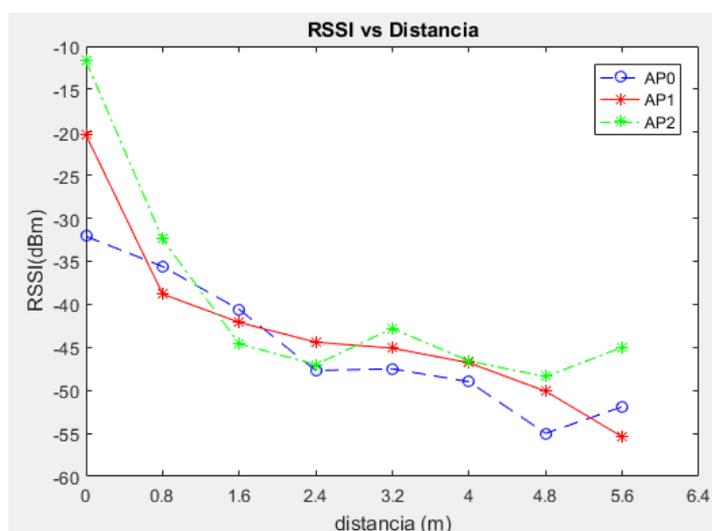


Figura 27: RSSI en función de la distancia para cada AP

Como se observa en la Figura 27, la relación entre el parámetro RSSI y la distancia a cualquiera de los AP's es no lineal, por lo que no existe una relación clara entre las dos medidas que permita deducir una distancia a partir de la variación del parámetro RSSI. Resultados semejantes fueron encontrados por Dobarco (2013).

Por ejemplo entre -10 a -38.8 dBm el módulo se puede encontrar de 0 a 0.8 m de distancia del respectivo AP y entre -40 a -55.5 dBm, la distancia puede ser desde 0.8 a 5.6 m. Además existen valores extremos del parámetro RSSI fuera del promedio

obtenido que podrían indicar valores que no corresponden con la distancia, lo cual representa la variabilidad del canal.

Del análisis se concluye que no es posible deducir la distancia entre el módulo WiFi y el AP, con un valor del parámetro RSSI medido considerando linealidad, debido a las múltiples interferencias, variabilidades y tendencia que denota más bien un aspecto logarítmico, lo que da lugar a utilizar técnicas de análisis como Fingerprints.

### 3.2.7. Diseño del Prototipo del sistema de posicionamiento local

Una vez que se ha realizado la caracterización de los elementos del LPS, se han interconectado para comunicar el módulo WiFi ESP8266-01 y el computador que contiene el servidor de base de datos y el servidor Web; lo que permite guardar y obtener los valores medidos del parámetro RSSI. El diagrama de bloques de los componentes de hardware puede ser visualizado en la Figura 28, las conexiones de alimentación y comunicación constan en la Tabla 17. Finalmente el diagrama de conexiones se lo ha realizado como se indica en la Figura 29.

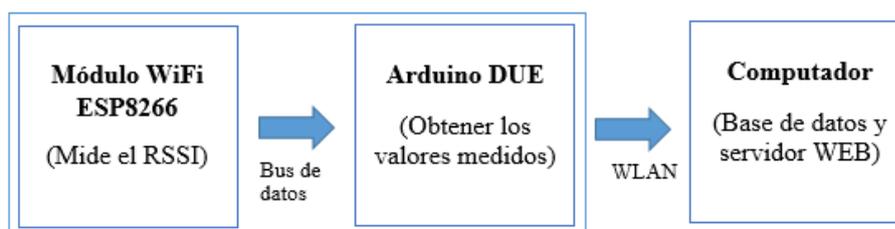


Figura 28: Diagrama de bloques del hardware del LPS

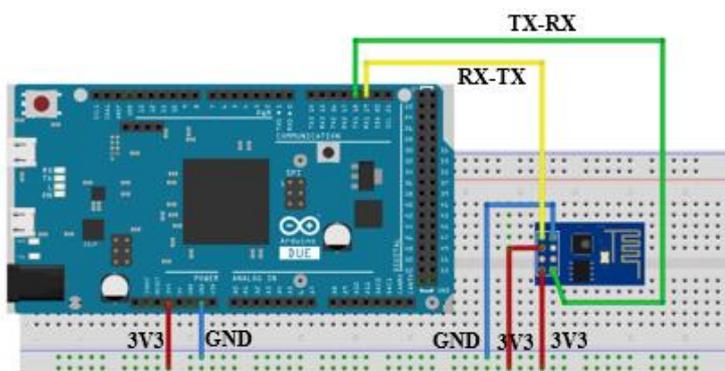


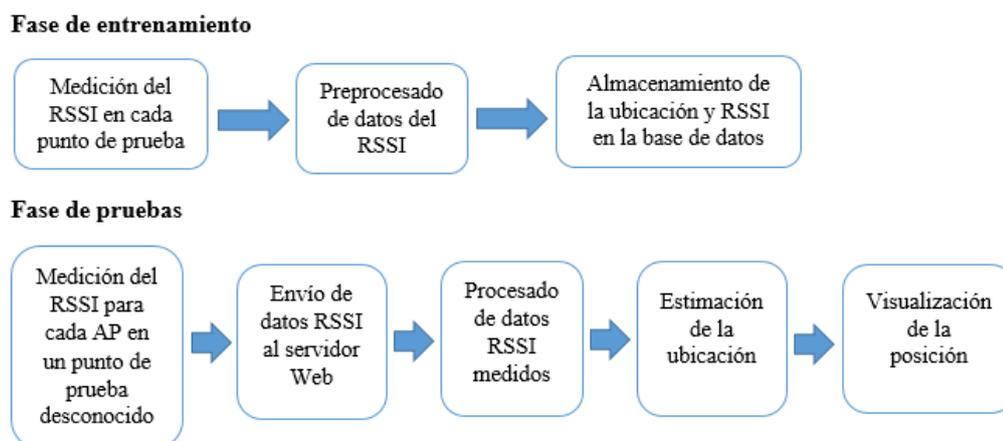
Figura 29: Diagrama de conexiones del LPS

**Tabla 17**  
**Interconexión de pines del módulo WiFi y Arduino DUE**

Arduino DUE	Módulo WiFi
3V3	VCC, CH_PD
GND	GND
TX	RX
RX	TX

### 3.3. Diseño del Software del Sistema de posicionamiento local

Como se definió en la sección 3.1.2, la técnica Fingerprints consta de dos fases, fase de entrenamiento (off-line) y fase de pruebas (on-line), las cuales serán detalladas más adelante. En la Figura 30 se presenta el diagrama de bloques del algoritmo del LPS especificado para cada fase.



*Figura 30: Diagrama de bloques del algoritmo del LPS*

En esta sección se explicará cómo se forma la base de datos Fingerprints, el funcionamiento del algoritmo de estimación de la posición y el procesamiento de los datos a través del Filtro de Kalman.

#### 3.3.1. Identificación de la posición de los dispositivos móviles

A causa de la relación no lineal que existe entre el parámetro RSSI y la distancia del AP con el dispositivo móvil, se ha aplicado la técnica Fingerprints que consiste en

comparar los nuevos valores medidos en la fase de pruebas con los almacenados en la base de datos Fingerprints. El nuevo valor medido, aplicado la técnica Fingerprints y considerando las múltiples interferencias o variabilidades, pueda que coincida con algunos rangos almacenados en la base de datos, lo que indicaría que existen una o algunas posibles posiciones (denominados puntos resultantes) donde podría estar el dispositivo móvil.

Es posible que los puntos resultantes de la técnica Fingerprints estén separados una distancia menor o mayor a 0.8m de la posición real del dispositivo móvil. Para una mejor explicación, se visualiza un ejemplo en la Figura 31, donde la posición real del móvil se representa con un punto rojo y las posibles posiciones estimadas con puntos verdes.



*Figura 31: Identificación de la posición del objetivo*

Para determinar si un punto resultante corresponde a una estimación correcta de la posición, la distancia entre la estimación y la posición real no debe sobrepasar el error propuesto de 0.8m, ya que con esto se garantizará que aunque la estimación no coincida exactamente con el punto real, al menos se encuentre en el mismo cuadrante o en el cuadrante más cercano a la posición real del dispositivo móvil. Haciendo referencia al ejemplo de la Figura 31, se observa que para el punto de prueba (punto rojo), todos los puntos dentro del círculo de 0.8m de radio, son considerados como

estimaciones válidas, mientras que todos los que están fuera de él se consideran como estimaciones erróneas.

El objetivo principal del LPS y su algoritmo es minimizar el número de puntos resultantes obtenidos con la técnica Fingerprints, hasta encontrar un solo punto que indique que es la posición estimada del dispositivo móvil.

### 3.3.2. Fase de entrenamiento

En la fase de entrenamiento se define la base de datos Fingerprints, que servirá para realizar la comparación con los nuevos valores obtenidos en la fase de pruebas y estimar la posición. Esta base de datos contiene la información del parámetro RSSI de los 3 AP's con la identificación de cada punto de prueba al que pertenecen. Como se indicó en la sección 3.1.3, existen 152 puntos de prueba no repetidos donde se realizaron 25 mediciones del parámetro RSSI de los 3 AP's cada 18s y durante diferentes días de la semana para cada punto en específico.

En la Figura 32, se indican las 25 mediciones del parámetro RSSI por cada AP, realizadas conforme el módulo WiFi se aleja una distancia de 0.8m cada vez, semejante a lo que se realizó en el análisis del parámetro RSSI en función de la distancia de la sección 3.2.6.4.

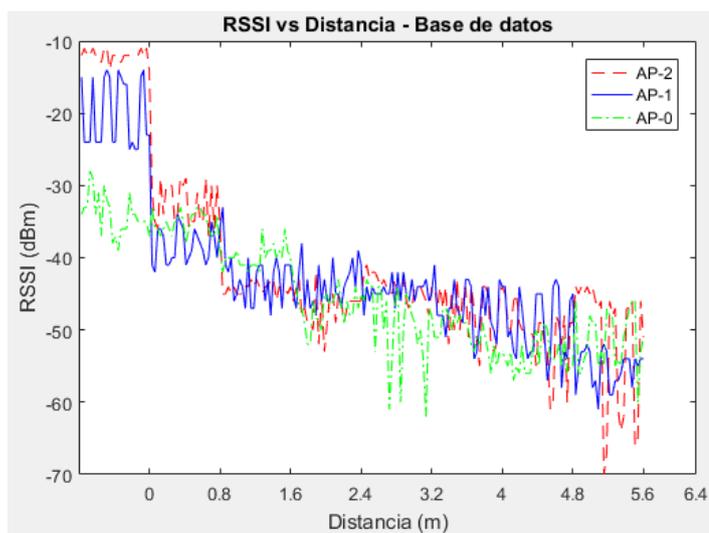


Figura 32: Medición del RSSI a lo largo de la distancia para la base de datos

Con el fin de mejorar la estimación de la posición debido a la variabilidad del medio, en la base de datos se definieron rangos de posibles valores para cada punto de prueba, ya que es probable que al realizar una nueva medición del parámetro RSSI en la fase on-line, esta se encuentre dentro de un rango de posibles valores, a que sea exactamente igual a un valor específico.

Autores como Oguchi et al. (2014), Papamantou, Preparata y Tamassia (2008), Chapre et al. (s. f.) y Navarro (2010), calculan la media aritmética y la desviación estándar del conjunto de mediciones del parámetro RSSI en las dos fases de la técnica Fingerprints para conocer la distribución de probabilidad de la posición. Sin embargo, para la fase de entrenamiento en este proyecto de investigación se utilizan los dos parámetros estadísticos (media aritmética y desviación estándar) para definir los rangos de posibles valores.

### 3.3.2.1. Métodos para definir el Rango de posibles valores

Para determinar los rangos de posibles valores, se emplearon dos métodos para construir la base de datos, los cuales que serán explicados y probados.

El primer método consiste en calcular la media aritmética ( $\bar{X}$ ) y la desviación estándar ( $\sigma$ ), del conjunto de 25 mediciones del parámetro RSSI, para determinar el rango de posibles valores para cada punto de prueba.

$$\text{Media aritmética: } \bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_N}{N} \quad (19)$$

$$\text{Desviación estándar: } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{N}} \quad (20)$$

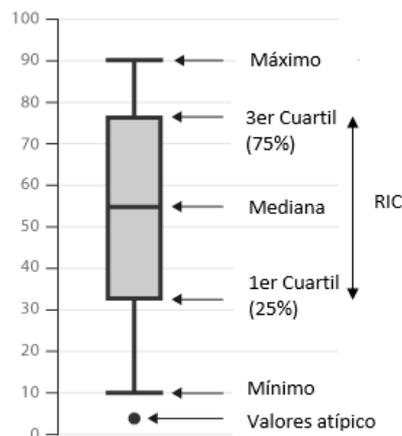
En base a ello, los límites máximos y mínimos del rango de posibles valores se definen como:

$$V_{max} = \bar{X} + \sigma \quad (21)$$

$$V_{min} = \bar{X} - \sigma \quad (22)$$

Una de las ventajas de este método es la simplicidad del cálculo de los parámetros estadísticos  $\bar{X}$  y  $\sigma$ , sin embargo presenta la desventaja de que estos parámetros pueden ser influenciados negativamente por valores atípicos, causando una notable distorsión en la definición de los rangos de posibles valores.

El segundo método tiene como objetivo determinar el rango de posibles valores en cada punto de prueba a través del rango de variación más probable o rango intercuartil (IQR) del conjunto de 25 mediciones del parámetro RSSI, debido a que por la variabilidad de la potencia RSSI existen mediciones que difieren marcadamente de las otras del conjunto. Una forma sencilla es usar herramientas estadísticas como el diagrama de caja, que está basado en cuartiles y mediante el cual se visualiza de forma estandarizada la distribución de un conjunto de datos indicando parámetros como el rango de variación total (del valor mínimo al máximo), el rango intercuartil (IQR), valor típico (mediana) y si existieran, valores atípicos (Mendenhall, Beaver y Beaver, 2010). En la Figura 33, se pueden visualizar cada uno de estos parámetros.



*Figura 33: Elementos del diagrama Boxplot*

Es importante conocer cómo se calcula cada uno de los cuartiles, aunque herramientas de software como Matlab lo realiza automáticamente. Mendenhall et al. (2010), indican que la fórmula general para calcular un cuartil es:

$$Q_k = \frac{k(N+1)}{4} \quad (23)$$

Donde  $N$  es el número total de datos,  $k$  es el número del cuartil (1, 2, 3 o 4) y  $Q_k$  indica la posición donde se encuentra el valor correspondiente a dicho cuartil, por lo que los datos previamente deben estar ordenados de forma ascendente. Si el resultado de  $Q_k$  no es un número entero, Mendenhall et al. (2010) señala que se utiliza la siguiente fórmula para indicar la posición del cuartil, considerando que  $i$  es la parte entera y  $d$  es la parte decimal:

$$Q_i = x_i + d(x_{i+1} - x_i) \quad (24)$$

El rango de variación más probable (IQR) es aquel donde se considera que se encuentra el 50% de las muestras y se define como la diferencia del cuartil  $Q_3$  y  $Q_1$ . El cuartil  $Q_2$  representa a la mediana del conjunto de pruebas. Los valores atípicos pueden ser causados por errores de medición o mal funcionamiento del equipo, y se encuentran por debajo del valor del límite mínimo y sobre el límite máximo (Mendenhall et al., 2010). Así esta herramienta permite obtener el rango de variación más probable de las mediciones realizadas para la base de datos del presente proyecto de investigación.

#### **3.3.2.1.1. Pruebas Realizadas**

Para determinar que método es más factible para aplicar en la base de datos Fingerprints se realizaron 10 mediciones del parámetro RSSI para cada uno de los 27 puntos de prueba desconocidos (PPD), especificados en la sección 3.1.3.1; con el objetivo de validarlos con los rangos propuestos con los métodos anteriores y verificar con cual se llega a una mayor probabilidad de acierto y menor número de puntos resultantes.

La Tabla 18 muestra los resultados de la probabilidad de acierto (PA) y el máximo número de puntos resultantes (MPR) de las pruebas realizadas con los rangos de las

bases de datos definidos por la media aritmética – la desviación estándar y el diagrama de cajas (rango de variación más probable).

**Tabla 18**  
**Resultados de las pruebas realizadas con las dos base de datos**

Base de datos	Definida por $\bar{X}$ y $\sigma$		Definida por el diagrama de cajas	
	PA (%)	MPR	PA (%)	MPR
1A	40	14	40	11
4E	50	16	50	11
8E	50	5	40	4
9E	70	18	30	12
12B	80	12	80	12
15C	30	11	40	8
17D	30	16	20	10
20E	30	15	20	10
23D	80	5	60	2
25E	0	0	0	0
28D	60	14	60	12
32C	70	16	70	14
33C	20	1	10	1
36E	50	4	40	3
40E	0	0	0	0
41E	10	6	0	0
44E	90	16	80	12
47C	100	11	80	11
49B	30	13	30	9
51E	60	15	60	13
56A	40	9	40	7
57E	50	10	60	15
60E	20	9	30	10
64E	70	7	70	4
65C	50	15	50	10
68C	60	18	60	13
72E	20	1	10	1

En la Figura 34 es posible visualizar un resumen de los resultados de la probabilidad de acierto de la Tabla 18.

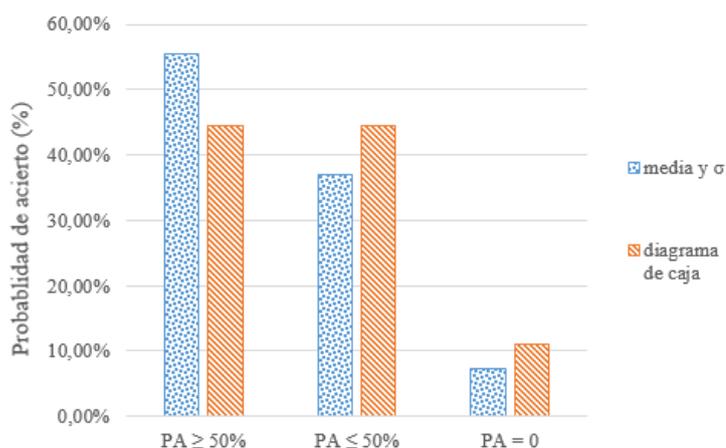


Figura 34: Resultados las pruebas realizadas con las dos bases de datos

De los resultados de la Tabla 18 se encuentra que:

- Al emplear una base de datos definida por  $\bar{X}$  y  $\sigma$ , el 55.56% de los puntos de prueba desconocidos obtienen una probabilidad de acierto mayor o igual al 50%, el 37.04% de los puntos alcanzan una probabilidad de acierto menor al 50% y el 7.41% tienen probabilidad de acierto nula.
- Al emplear una base de datos definida por el rango de variación más probable o intercuartil (diagrama de caja), el 44.44% de los puntos de prueba desconocidos alcanzan una probabilidad de acierto mayor o igual al 50%, el otro 44.44% de los puntos obtienen una probabilidad de acierto menor al 50% y el 11.11% tienen probabilidad de acierto nula.

En cuanto al análisis del máximo número de puntos resultantes con los dos tipos de rangos de posibles valores de las bases de datos, se obtuvo que:

- Al usar la base de datos definida por  $\bar{X}$  y  $\sigma$ , existen máximo 18 puntos resultantes y mínimo 4 puntos.
- Con la base de datos definida con el rango de variación más probable, existen máximo 15 puntos resultantes y como mínimo 2 puntos.
- Usando cualquiera de los dos tipos de base de datos, particularmente en los puntos 33C y 72E, se obtiene un solo punto que indica la posición estimada.

Del análisis de los resultados de la Tabla 18, se concluye que al usar la base de datos definida por el rango de variación más probable, se obtienen menos puntos resultantes que identifican a la posición estimada, en comparación con los resultados de la base de datos definida por  $\bar{X} - \sigma$ ; esto representa a una ventaja, al tener menos puntos posibles sobre los cuales decidir. Otra de las ventajas de usar este rango de posibles valores en la base de datos, es que se tiene el 50% de seguridad, que una nueva medición del parámetro RSSI este dentro de dicho rango; al contrario de lo que sucede al utilizar la otra base de datos propuesta, donde  $\bar{X}$  puede ser influenciado por algún valor atípico que la aumente o disminuya en exceso y por ende afecte al rango definido por  $\sigma$ , lo que provocaría mayores puntos resultantes posibles.

Sin embargo, una de las desventajas del rango de posibles valores escogido para la base de datos, es que el porcentaje de puntos de prueba desconocidos (PPD) identificados con probabilidad de acierto mayor o igual al 50% es menor en comparación al porcentaje de los resultados obtenidos por el método de  $\bar{X}$  y  $\sigma$ . Esto se pretende mejorar con la implementación del algoritmo de estimación en la fase de pruebas.

### **3.3.3. Fase de pruebas**

La fase de pruebas de Fingerprints, tiene como objetivo desarrollar un algoritmo de estimación que permita comparar las mediciones del parámetro RSSI con los valores almacenados en la base datos Fingerprints, logrando la mayor probabilidad de acierto y obteniendo una estimación lo más acertada posible de la posición real del dispositivo móvil. Para ello, se realizaron varias aproximaciones sobre el algoritmo, con el fin de encontrar la mejor estimación para el LPS en interiores, los cuales serán discutidos más adelante.

#### **3.3.3.1. Definición del número de mediciones para el algoritmo de estimación**

Como requerimiento para evaluar los algoritmos de estimación para el LPS, se debe determinar el número de nuevas mediciones y el intervalo de tiempo entre cada una de ellas. Por esta razón se realizó un análisis para determinar si las muestras instantáneas

del parámetro RSSI o el promedio de varias de ellas, es el mejor camino. Autores como Figuera (2009), Navarro (2010) y Takens (2010), recomiendan calcular el promedio de un alto número de mediciones del parámetro RSSI para reducir la variabilidad y obtener un valor fiable. Cada una de estas mediciones es realizada en intervalos de tiempo de 100 ms como mínimo y 5s como máximo.

Una de las desventajas del módulo ESP8266-01 es la cantidad de tiempo que toma en medir el parámetro RSSI de los 3 AP's, lo que dificulta un número de mediciones alto, ya que implica un mayor tiempo de medición; tiempo en el cual el dispositivo móvil puede haber cambiado de posición o haber recorrido toda el área de interés. Debido a las limitaciones del módulo WiFi, las mediciones instantáneas del parámetro RSSI de los 3 AP's son realizadas en intervalos de tiempo de alrededor de 18s aproximadamente. Sin embargo se realizaron pruebas, para conocer el desempeño del LPS al calcular el promedio de 5 mediciones del parámetro RSSI para cada AP (AP-0, AP-1 y AP-2), procedimiento que tomará alrededor de 90 s (1 min y 30 s aproximadamente).

En base a las dos formas descritas, se realizaron 10 pruebas en cada uno de los 27 puntos PPD, para analizar la probabilidad de acierto (PA) y el máximo número de puntos resultantes (MPR). Para estas pruebas se emplea la base de datos Fingerprints definida por los rangos de variación más probables. En la Tabla 19 se pueden evidenciar los resultados.

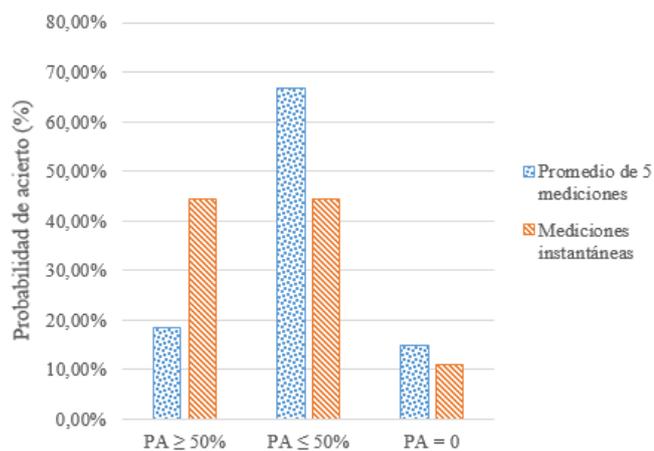
**Tabla 19**  
**Resultados de las pruebas realizadas con el promedio de 5 mediciones y valores instantáneos**

Fase online	Promedio de 5 mediciones		Valores Instantáneos		
	PPD	PA (%)	MPR	PA (%)	MPR
1A	10	6	40	11	
4E	40	6	50	11	
8E	50	4	40	4	
9E	30	8	30	12	
12B	50	7	80	12	

CONTINÚA →

15C	40	5	40	8
17D	10	8	20	10
20E	30	10	20	10
23D	40	2	60	2
25E	0	0	0	0
28D	50	12	60	12
32C	40	3	70	14
33C	0	0	10	1
36E	30	3	40	3
40E	30	2	0	0
41E	0	0	0	0
44E	40	9	80	12
47C	70	7	80	11
49B	10	7	30	9
51E	30	8	60	13
56A	10	1	40	7
57E	40	13	60	15
60E	20	10	30	10
64E	30	2	70	4
65C	0	0	50	10
68C	60	11	60	13
72E	10	1	10	1

En la Figura 35 se visualiza un resumen de los resultados de la Tabla 19.



*Figura 35: Resultados las pruebas realizadas con el promedio de 5 mediciones y valores instantáneos*

Los resultados de la Tabla 19 y Figura 35, muestran que:

- Probabilidad de acierto

- Al utilizar el promedio de 5 mediciones del parámetro RSSI, como se observa en la Figura 34, el 18.52% de los puntos de prueba desconocidos alcanzan una probabilidad de acierto mayor o igual al 50%, el 66.67% logra una probabilidad de acierto menor al 50% y el 14.81% tiene probabilidad de acierto nula.
  - Al utilizar valores instantáneos del parámetro RSSI, el 44.44% de los puntos de prueba desconocidos alcanzan una probabilidad de acierto mayor o igual al 50%, el otro 44.44% tiene probabilidad de acierto menor al 50% y el 11.11% presenta probabilidad de acierto nula.
- Máximo número de puntos resultantes
    - Cuando la probabilidad de acierto es nula, no existe algún punto resultante para estimar la posición.
    - Cuando la probabilidad de acierto es diferente de cero puede existir uno o más puntos resultantes para estimar la posición. Sin embargo, al emplear cualquiera de los dos métodos, solo el 7.41% de los puntos de prueba desconocidos presentan un punto para estimar la posición.

De este análisis se concluye que en base a la probabilidad de acierto, es preferible realizar las pruebas del LPS con mediciones instantáneas del parámetro RSSI para cada AP, ya que se obtiene un mayor porcentaje de puntos de prueba desconocidos con probabilidad de acierto mayor o igual al 50% en comparación a los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con el valor promedio. Además el tiempo de medición del RSSI es menor cuando se utilizan valores instantáneos y se quintuplica cuando se calcula el valor promedio de cinco mediciones.

### **3.3.3.2. Algoritmos para estimar la posición**

Como se ha evidenciado en las pruebas realizadas anteriormente, existe una gran cantidad de puntos resultantes que no permiten una estimación clara de la posición del dispositivo móvil. Para esto se han desarrollado una serie de algoritmos de estimación,

que tienen como fin, reducir el número de puntos resultantes y lograr en lo posible mejorar el desempeño del LPS.

### 3.3.3.2.1. Algoritmo 1: Implementación de condiciones

Este algoritmo añade una serie de condiciones, antes de realizar la comparación entre el nuevo valor medido del parámetro RSSI y los valores de la base de datos Fingerprints. Para añadir las condiciones, se divide nuevamente el área de pruebas en secciones según los diagramas de intensidad del RSSI para cada AP. Estos diagramas indican el comportamiento del parámetro RSSI de acuerdo a la posición del AP. Las Figuras 36, 37 y 38 indican los diagramas estimados de la intensidad del parámetro RSSI del AP-0, AP-1 y AP-2 respectivamente, siendo el RSSI mayor en los lugares más oscuros y menor en los lugares más claros, teniendo en cuenta que la escala de la potencia RSSI va de 0 a -100.

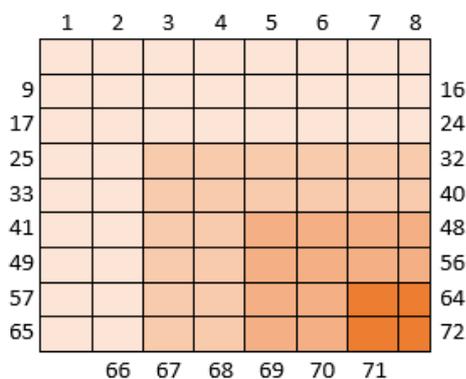


Figura 36: Intensidad del RSSI del AP-0 a lo largo del área

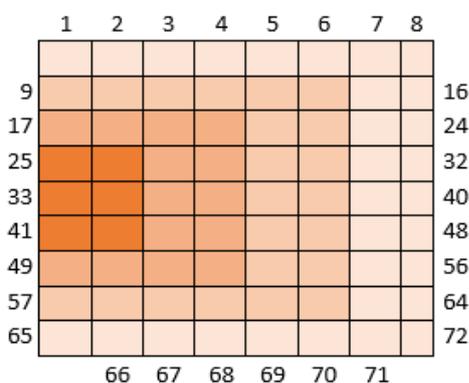


Figura 37: Intensidad del RSSI del AP-1 a lo largo del área



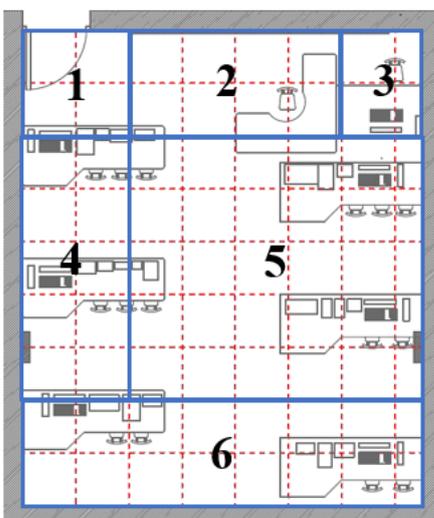


Figura 39: División del área de pruebas para el algoritmo 1

Para conocer el desempeño del algoritmo se analiza la probabilidad de acierto (PA) y el número de puntos resultantes (MPR), para lo cual se realizaron 10 mediciones del parámetro RSSI en cada uno de los 27 puntos de prueba desconocidos, para determinar si estas condiciones benefician o no al LPS. En la Tabla 20, se pueden visualizar los resultados.

**Tabla 20**  
**Resultados de las pruebas realizadas con el algoritmo de implementación de condiciones**

Nro.	PPD	PA (%)	MPR	Nro.	PPD	PA (%)	MPR
1	1A	50	4	15	40E	0	0
2	4E	20	2	16	41E	0	0
3	8E	40	3	17	44E	0	0
4	9E	30	4	18	47C	20	9
5	12B	70	3	19	49B	30	1
6	15C	30	5	20	51E	10	2
7	17D	10	1	21	56A	10	2
8	20E	10	1	22	57E	0	0
9	23D	0	0	23	60E	10	7
10	25E	50	0	24	64E	70	3
11	28D	0	0	25	65C	0	0
12	32C	10	8	26	68C	10	5
13	33C	90	1	27	72E	100	1
14	36E	0	0				

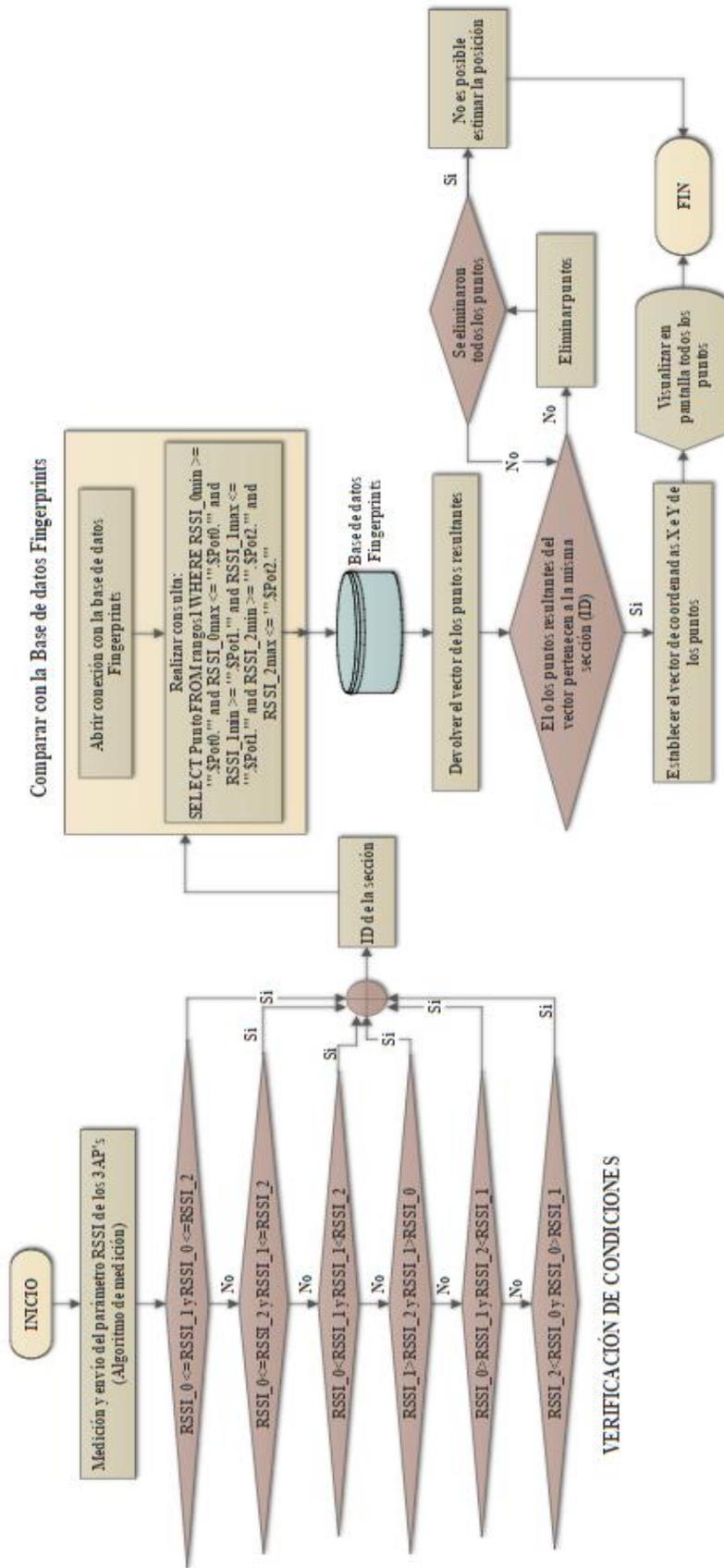
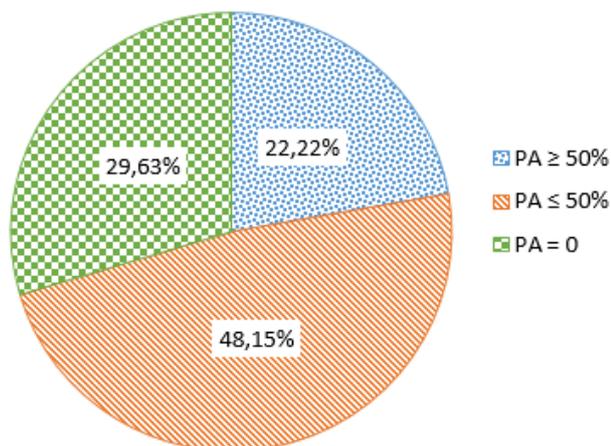


Figura 40: Diagrama de flujo del algoritmo implementación de condiciones

En la Figura 41, se resumen los resultados de las pruebas del algoritmo con respecto a la probabilidad de acierto.



*Figura 41: Resultados respecto a la PA del algoritmo 1*

De acuerdo a los resultados de la Tabla 20 se encuentra que:

- El 22.22% de los puntos de prueba desconocidos alcanzan una probabilidad de acierto mayor o igual al 50%, el 48.15% de los puntos logran una probabilidad de acierto menor al 50% y el 29.63% tiene probabilidad de acierto nula.
- El porcentaje de puntos de prueba desconocidos con un solo punto estimado es 18.52%.
- El 51.85% de los puntos de prueba desconocidos con probabilidad de acierto diferente de cero, tienen de 9 a 2 puntos resultantes que identifican a la posición.
- El 29.63% de los puntos de prueba desconocidos no obtienen ningún punto resultante para estimar la posición.

Por lo tanto se puede indicar que el rendimiento del algoritmo no es bueno, ya que tiene un alto porcentaje de puntos desconocidos con probabilidad de acierto nula y la cantidad de múltiples puntos resultantes es aún elevada y no permite estimar la posición de forma clara.

### 3.3.3.2.2. Algoritmo 2: Validación de resultados

El algoritmo validación de resultados consiste en comparar las coordenadas X e Y de los puntos resultantes de algunas mediciones instantáneas del parámetro RSSI, hasta conseguir un solo punto que coincida en todas las mediciones o promediar las coordenadas entre los puntos resultantes más cercanos.

Para no incrementar demasiado el tiempo de estimación de la posición se tomará máximo tres mediciones instantáneas del parámetro RSSI para cada AP en un mismo punto de prueba para validar los resultados. Este procedimiento de medición tomará alrededor de 18s a 54s dependiendo de la cantidad de mediciones que se requiera. A continuación se realiza una breve explicación del funcionamiento del algoritmo.

#### A. Primera medición

- Se realizará la primera medición del parámetro RSSI de los 3 AP's, si el resultado de la comparación con la base de datos es un solo punto resultante (PR1), este será el que estime la posición.
- Si existe más de un punto resultante PR1, se requerirá de una segunda medición.

#### B. Segunda medición

- Cuando PR1 muestra más de un punto resultante se realizará la segunda medición del parámetro RSSI de los 3 AP's, para obtener los puntos resultantes PR2 al comparar con la base de datos. Luego se comparan los puntos PR1 y PR2 uno a uno, en búsqueda de coincidentes. Los puntos coincidentes entre los dos resultados se denominan PC1-2.
- Si existe un solo punto PC1-2 luego de la comparación; ese punto será el que se considera que estima la posición.
- Por otro lado, si existen dos puntos PC1-2, se calcula el promedio de las coordenadas X e Y de dichos puntos, para estimar la posición.
- Al existir más de dos puntos PC1-2, se requerirá de una tercera medición.

- Si no existen puntos PC1-2, se calcula la distancia entre las coordenadas X e Y de todos los puntos PR1 y PR2. Si la distancia entre un punto PR1 y PR2 es menor a 0.8m, se promedian sus coordenadas para estimar la posición, caso contrario se requerirá de una tercera medición.

### C. Tercera medición

- Cuando no existen puntos PC1-2 y la distancia entre los puntos PR1 y PR2 es superior a 0.8m o cuando PC1-2 muestra más de dos puntos, se realiza la tercera medición del parámetro RSSI de los 3 AP's para obtener los puntos resultantes PR3 luego de comparar con la base de datos; estos puntos PR3 se comparan con los puntos PR1 y PR2 anteriores en búsqueda de coincidencias. Los puntos coincidentes entre PC1-2 y PR3 se denominan PC1-2-3 y como PC2-3 se conoce a los puntos coincidentes entre PR2 y PR3.
- Si existe un solo punto PC1-2-3, éste se considera que estima la posición.
- Si existen dos puntos PC1-2-3, se calcula el promedio de las coordenadas X e Y de los dos puntos, para estimar la posición.
- Si resultan más de dos puntos PC1-2-3 y existen otros puntos PC1-2 que no coincidan con PC1-2-3, se calcula la distancia entre las coordenadas de estos puntos y PC1-2-3. Por otro lado si no existen más puntos PC1-2, se buscan puntos PC2-3 no coincidentes con PC1-2-3, para realizar el mismo procedimiento anterior. Por lo cual para estimar la posición se considera el punto PC1-2-3 más cercano a los puntos no coincidentes de PC1-2 o PC2-3 según corresponda.
- Sin embargo, si existen más de dos puntos PC1-2-3 y no existen otros puntos PC1-2 y PC2-3 no coincidentes con PC1-2-3, se calcula el promedio de las coordenadas X e Y de todos los puntos PC1-2-3 para estimar la posición.
- Por otro lado si no existen puntos PC1-2-3 y solo existe un punto PC2-3, éste se considera que estima la posición.
- Si no existen puntos PC1-2-3 y existen dos puntos PC2-3, se calcula el promedio de las coordenadas X e Y de los dos puntos, para estimar la posición.

- Si resultan más de dos puntos PC2-3 y no existen puntos PC1-2-3, se calcula el promedio de las coordenadas X e Y de los todos los puntos PC2-3 para estimar la posición.
- Si no existen puntos PC1-2-3 y existen puntos PC1-2 y PC2-3, se calcula el promedio de las coordenadas X e Y de los primeros puntos PC1-2 y PC2-3 más cercanos.
- Si no existen puntos PC1-2-3 ni PC2-3 se calcula el promedio de las coordenadas X e Y de los todos los puntos PC1-2 para estimar la posición.
- Si existe un solo punto PR3 y no concuerda con los puntos PC1-2, se calcula la distancia entre las coordenadas de PR3 y PC1-2, para escoger el punto PC1-2 más cercano a PR3, para estimar la posición.
- Si no existen puntos PC1-2 ni PC2-3, lo que significa que no hubieron coincidencias entre las tres mediciones, no será posible estimar la posición.

En la Figura 42, se visualiza el diagrama de flujo resumido del algoritmo de validación de resultados, donde se indica cada uno de los procedimientos.

Se realizaron 10 pruebas en cada uno de los 27 puntos de prueba desconocidos para conocer el desempeño del algoritmo, analizando tanto la probabilidad de acierto (PA) como el máximo número de puntos de resultantes (MPR). En la Tabla 21, se pueden visualizar los resultados de las pruebas.

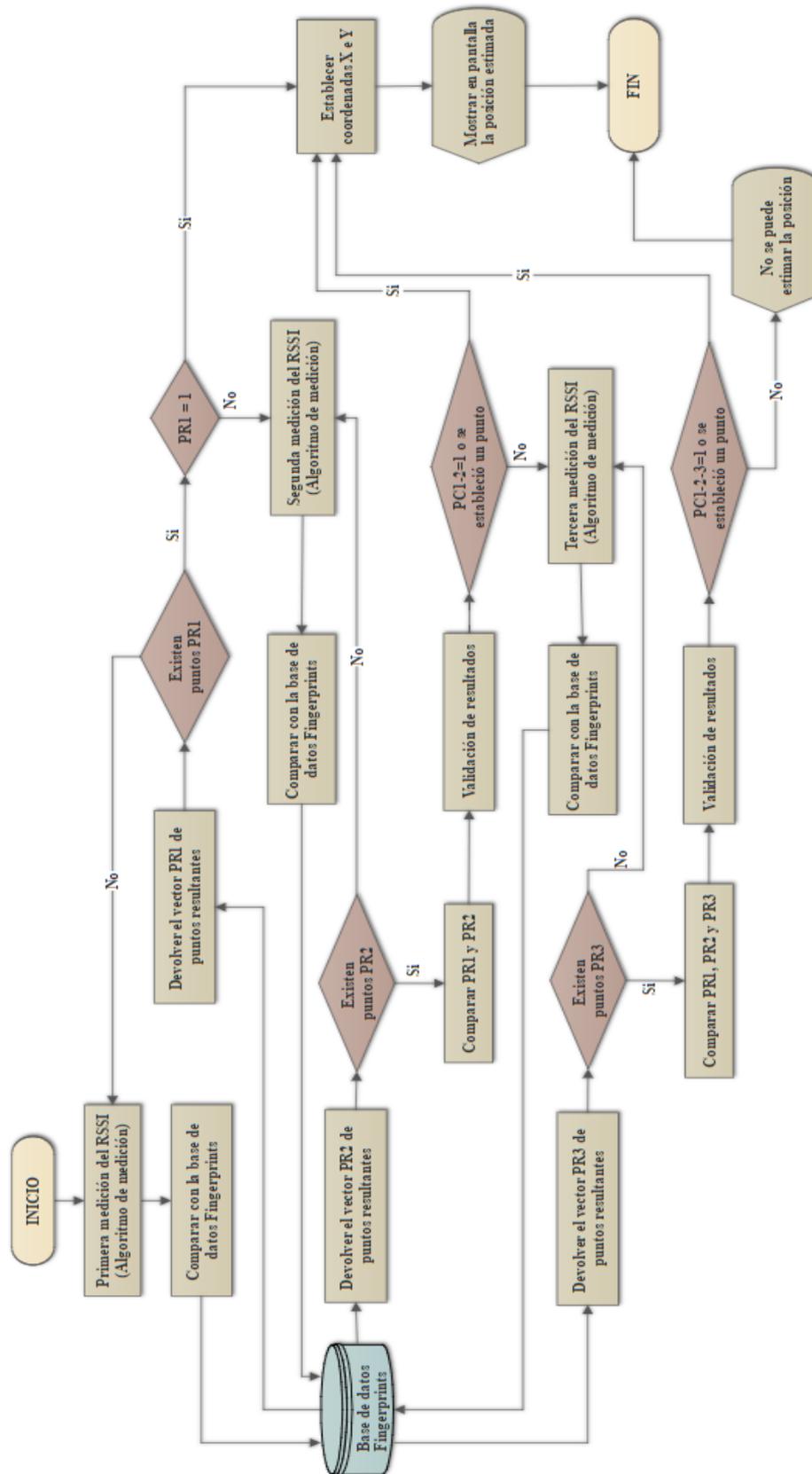
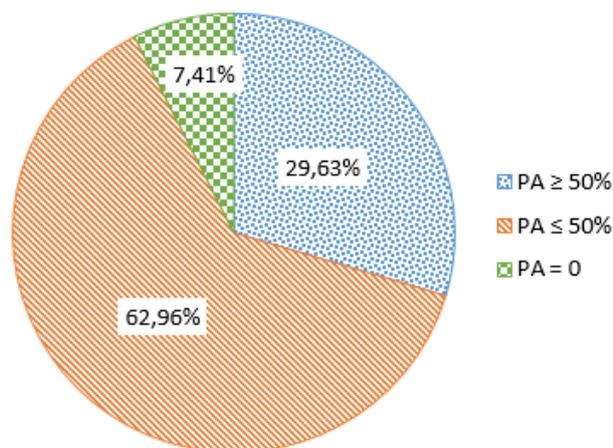


Figura 42: Diagrama de flujo del algoritmo validación de resultados

**Tabla 21**  
**Resultados de las pruebas realizadas con el algoritmo validación de resultados**

Nro.	PPD	PA (%)	MPR	Nro.	PPD	PA (%)	MPR
1	1A	50	1	15	40E	10	1
2	4E	20	1	16	41E	30	1
3	8E	30	1	17	44E	20	1
4	9E	0	1	18	47C	50	1
5	12B	20	1	19	49B	10	1
6	15C	20	1	20	51E	10	1
7	17D	10	1	21	56A	20	1
8	20E	20	1	22	57E	10	1
9	23D	70	1	23	60E	10	1
10	25E	90	1	24	64E	70	1
11	28D	0	1	25	65C	20	1
12	32C	70	1	26	68C	10	1
13	33C	100	1	27	72E	100	1
14	36E	30	1				



*Figura 43: Resultados respecto a la PA del algoritmo 2*

Los resultados de la Tabla 21 indican que:

- El 29.63% de los puntos de prueba desconocidos alcanzan una probabilidad de acierto mayor o igual al 50%, el 62.96% de los puntos logran una probabilidad de acierto menor al 50% y tan solo el 7.41% tiene probabilidad de acierto nula.
- El 100% de los puntos de prueba desconocidos, tienen como resultado un solo punto para estimar la posición.

En la Figura 43, se visualizan los resultados de este algoritmo de acuerdo a los porcentajes de probabilidad de acierto obtenidos en la Tabla 21.

Después del análisis se concluye que el algoritmo de validación de resultados cumple con el objetivo de encontrar un solo punto para estimar la posición, además se reduce el porcentaje de puntos de prueba desconocidos con probabilidad de acierto nula y aumenta el porcentaje de puntos con probabilidad de acierto mayor o igual al 50%, en contraposición con los resultados del algoritmo 1: implementación de condiciones.

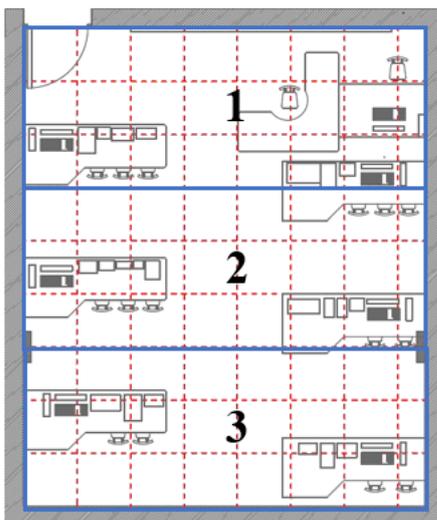
### **3.3.3.2.3. Algoritmo 3: Validación de resultados con implementación de condiciones**

Debido a los buenos resultados obtenidos con el algoritmo anterior, se intenta mejorar el desempeño del LPS combinando la validación de resultados con la implementación de condiciones, pero esta vez el área de pruebas no será dividido en seis secciones, ya que como se verificó con el primer algoritmo, esa división no obtuvo buenos resultados.

El área de pruebas ahora será dividido en tres secciones, para simplificar la predicción del comportamiento del parámetro RSSI de los 3 AP's. Cada cuadrante que conforma a cada una de las secciones, es escogido en función de la potencia RSSI medida como factor diferenciador. En la Figura 44, se puede evidenciar la nueva división del área de pruebas.

A continuación se detallan las condiciones que deben cumplir las mediciones del parámetro RSSI para pertenecer a cada una de las secciones:

- Sección 1 →  $RSSI_0 < RSSI_1$  y  $RSSI_0 < RSSI_2$
- Sección 2 →  $RSSI_1 < \text{ó} > RSSI_0$  y  $RSSI_1 < RSSI_2$
- Sección 3 →  $RSSI_2 < RSSI_1$  y  $RSSI_2 < RSSI_0$



*Figura 44: División del área de pruebas en tres secciones*

En la Figura 45, se visualiza el procedimiento del algoritmo de validación de resultados con implementación de condiciones a través del diagrama de flujo.

Con la implementación de este algoritmo, se realizaron 10 pruebas en cada uno de los 27 puntos de prueba desconocidos para conocer tanto la probabilidad de acierto (PA) como el máximo número de puntos resultantes (MPR). En la Tabla 22 se pueden visualizar los resultados de las pruebas y en la Figura 46 se indican los resultados de la probabilidad de acierto obtenidos con la implementación del algoritmo de validación de resultados e implementación de condiciones.

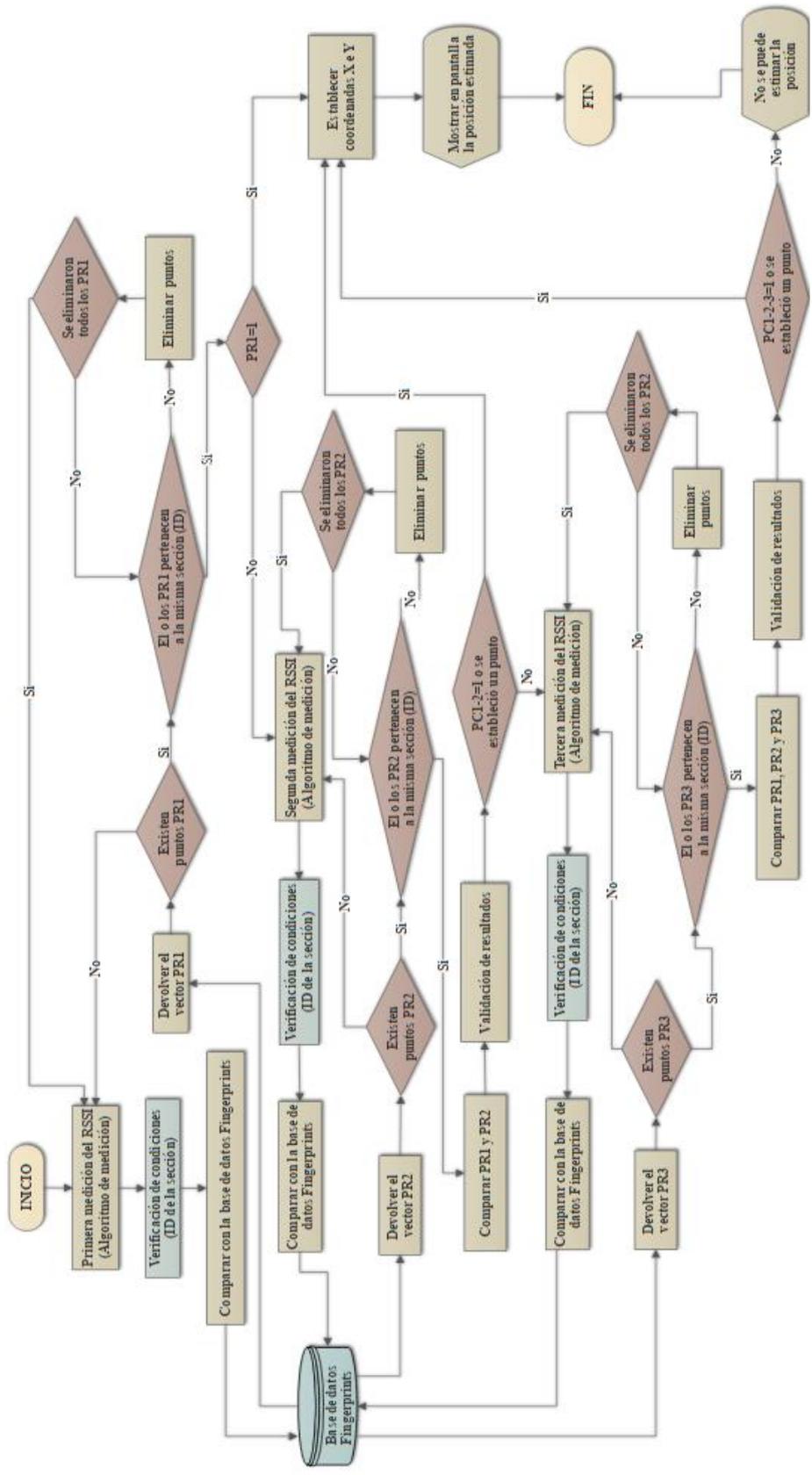
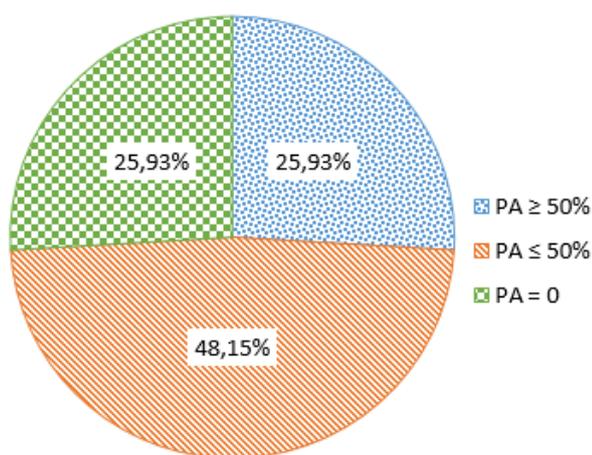


Figura 45: Diagrama de flujo del algoritmo de validación de resultados con implementación de condiciones

**Tabla 22**  
**Resultados de las pruebas realizadas con el algoritmo de validación de resultados con implementación de condiciones**

Nro.	PPD	PA (%)	MPR	Nro.	PPD	PA (%)	MPR
1	1A	70	1	15	40E	10	1
2	4E	20	1	16	41E	10	1
3	8E	20	1	17	44E	0	1
4	9E	10	1	18	47C	20	1
5	12B	40	1	19	49B	30	1
6	15C	60	1	20	51E	0	1
7	17D	0	1	21	56A	0	1
8	20E	30	1	22	57E	10	1
9	23D	70	1	23	60E	10	1
10	25E	50	1	24	64E	60	1
11	28D	0	1	25	65C	30	1
12	32C	20	1	26	68C	0	1
13	33C	100	1	27	72E	100	1
14	36E	0	1				



*Figura 46: Resultados respecto a la PA del algoritmo 3*

Los resultados de la Tabla 22 indican que:

- El 25.93% de los puntos de prueba desconocidos alcanzan una probabilidad de acierto mayor o igual al 50%, el 48.15% de los puntos logran una probabilidad de acierto menor al 50% y el 25.93% tiene probabilidad de acierto nula.
- Todos los puntos de prueba desconocidos, tienen como resultado un solo punto para estimar la posición buscada.

Del análisis se concluye que el rendimiento del LPS no mejora, ya que aumenta el porcentaje de puntos de prueba desconocidos con probabilidad de acierto nula, en comparación con los resultados del algoritmo validación de resultados sin implementación de condiciones.

#### 3.3.3.2.4. Análisis de los algoritmos para estimar la posición

Los resultados de cada algoritmo para estimar la posición se pueden ver en la Tabla 23, donde se encuentra que el algoritmo con mejor desempeño es la validación de resultados (algoritmo 2), ya que existe mayor cantidad de puntos desconocidos con probabilidad de acierto mayor o igual al 50% y el porcentaje de probabilidad de acierto nula es bajo, en comparación a los resultados de los otros dos algoritmos. Además la validación de resultados con o sin implementación de condiciones logra definir un solo punto que identifique a la posición, algo que no se alcanza al emplear el algoritmo 1, que únicamente usa la implementación de condiciones.

**Tabla 23**  
**Resultados de cada algoritmo de estimación de la posición**

	<b>Algoritmo 1</b>	<b>Algoritmo 2</b>	<b>Algoritmo 3</b>
PA $\geq$ 50%	22,22%	29,63%	25,93%
PA $\leq$ 50%	48,15%	62,96%	48,15%
PA = 0	29,63%	7,41%	25,93%

Cabe mencionar en cuanto al tiempo de medición del RSSI, que el algoritmo 1: implementación de condiciones, es el que menor tiempo requiere (alrededor de 18s) ya que únicamente realiza una medición del parámetro RSSI de los 3 AP's, al contrario de los algoritmos 2 y 3 que pueden llegar a necesitar hasta 3 mediciones sucesivas durante 54s. En este caso el tiempo deja de ser relevante, ya que a mayor tiempo se garantiza tener un solo punto que identifique la posición del dispositivo móvil, al contrario de lo que sucede al emplear menor tiempo y tener una gran cantidad de puntos que no puedan ser discriminados para saber cuál realmente representa a la posición estimada.

Por lo tanto de lo descrito anteriormente, el algoritmo elegido para la estimación de la posición en la fase on-line es la validación de resultados, al ser el que mejor cumple con los objetivos del LPS en interiores. Cabe indicar que los resultados de este algoritmo posteriormente serán necesarios para el procesamiento de los datos a través del filtro de Kalman.

#### **3.3.4. Procesamiento de datos a través de la implementación del filtro de Kalman**

La etapa de procesamiento de datos a través del filtro de Kalman pretende corregir las mediciones del parámetro RSSI tomadas en la fase de pruebas para lograr una mayor precisión en la estimación de la posición estática del dispositivo móvil. En este caso particular el estado del filtro de Kalman corresponde solamente al parámetro RSSI y se hace uso de las ecuaciones de la Tabla 1, cuyos parámetros serán evaluados para garantizar un mayor desempeño del filtro. El objetivo de la implementación del filtro de Kalman es suavizar las variaciones de las múltiples mediciones instantáneas del parámetro RSSI de los 3 AP's para luego ser evaluadas por el algoritmo de estimación de la posición en un mismo punto de prueba y poder disminuir el tiempo de detección de la posición.

Autores como Dobarco (2013), Marín (2011), Martínez (2013) y Rocés (2016), establecen que es preferible contar con varios sensores (acelerómetro, giroscopio, magnetómetro, cámara, etc.) que permitan obtener mayor información del entorno (como orientación, velocidad, etc.) para mejorar el desempeño del filtro de Kalman. Una de las limitaciones del presente LPS en interiores es que solo cuenta con un único sensor que permite medir del parámetro RSSI, por lo que no existe otro parámetro con el cual compararlo o relacionarlo. Por esta razón se hace uso del filtro de Kalman considerando una relación lineal entre varias mediciones del parámetro RSSI en un mismo punto de prueba.

El filtro de Kalman será implementado para estimar la posición estática del dispositivo móvil, para lo cual se requiere de una medición inicial del parámetro RSSI, lo que implica un aumento en el tiempo de identificación de la posición. A

continuación se detalla el procedimiento y consideraciones para determinar los parámetros del filtro.

### 3.3.4.1. Parámetros del filtro de Kalman

La elección del valor de cada uno de los parámetros del filtro de Kalman es muy importante para lograr un buen desempeño. El vector de estados del filtro ( $x_k$ ) contendrá tres elementos que corresponden al valor del parámetro RSSI de cada AP (AP\_0, AP\_1 y AP\_2), como se indica en la Ecuación 25, estos valores serán modificados mientras se realizan los cálculos sucesivos hasta que las 3 mediciones de los 3 AP's pasen por el filtro.

$$x_k = \begin{bmatrix} RSSI\_0 \\ RSSI\_1 \\ RSSI\_2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Como se mencionó en la fase de pruebas durante la definición del número de mediciones, el vector de estados corresponderá a valores instantáneos del parámetro RSSI medidos por el módulo WiFi ESP8266-01.

Las matrices  $A$  y  $H$  de las ecuaciones de predicción y corrección del filtro (Ver Tabla 1) corresponden a matrices identidad, ya que se considera un modelo lineal del parámetro RSSI para cada AP en un mismo punto, es decir que el estado a priori ( $k - 1$ ) debe ser igual al estado posteriori ( $k$ ) y las mediciones ruidosas ( $z_k$ ), de la Ecuación 10, deben ser exactamente igual al estado  $x_k$ . Martínez (2013) indica que el vector de entrada de control opcional ( $\mu_k$ ), de la Ecuación 7, puede considerarse nulo para simplificar los cálculos, con esta consideración el valor de la matriz  $B$  ya no tiene relevancia, por lo que la ecuación se simplifica a:

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} \quad (26)$$

Los autores Martínez (2013), Marín (2011), Pascual (2006) y Welch y Bishop (2006) indican que la matriz  $R$ , utilizada en la Ecuación 9 para calcular la ganancia del filtro, se obtiene calculando la varianza y covarianza entre los valores de los sensores,

realizando varias mediciones del mismo parámetro por un largo periodo de tiempo y si estos valores no producen un buen desempeño del filtro, es decir una rápida convergencia, se recomienda ajustarlo de forma manual.

Ya que el actual LPS tan solo cuenta con un sensor que mide el parámetro RSSI de los 3 AP's, no tiene sentido calcular la covarianza entre sensores ya que es nula porque se usa el mismo sensor para medir las tres potencias. De acuerdo a esto, se calcula la varianza para cada estado del sistema  $x_k$  de toda la información recolectada durante la fase de entrenamiento, es decir de las 25 mediciones del parámetro RSSI en cada uno de los 152 puntos de prueba para cada AP. La varianza (*var*) es definida como el cuadrado de la desviación estándar y es usada para calcular la matriz  $R$  ( $3 \times 3$ ). A continuación se indica cómo se realizó el cálculo de la matriz  $R$ .

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (RSSI_i - \overline{RSSI})^2}{25}} \quad (27)$$

$$\sigma_l = \frac{\sum_{j=1}^{152} \sigma_j}{152} \quad (28)$$

$$var_l = \sigma_l^2 \quad (29)$$

$$R = \begin{bmatrix} var_1 & 0 & 0 \\ 0 & var_2 & 0 \\ 0 & 0 & var_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9.73 & 0 & 0 \\ 0 & 9.92 & 0 \\ 0 & 0 & 10.56 \end{bmatrix} \quad (30)$$

La Ecuación 27 indica el cálculo de la desviación estándar ( $\sigma_j$ ) de las 25 mediciones del parámetro RSSI en un punto de prueba para un solo AP. Se calcula para un AP el promedio de la desviación estándar de los 152 puntos de prueba como se indica en la Ecuación 28. La varianza para cada AP, se obtiene elevando al cuadrado la desviación estándar  $\sigma_l$ , por lo que la matriz  $R$  se define como se indica en la Ecuación 30.

Para determinar la matriz  $Q$ , empleada en la Ecuación 8 para proyectar el error de covarianza, se opta por el procedimiento recomendado por Marín (2011), donde señala que  $Q$  es una matriz diagonal, ya que no existe correlación entre los estados, los valores

de la diagonal son asignados primeramente del mismo orden de los valores de la diagonal de la matriz  $R$  y según el desempeño del filtro estos valores se pueden incrementar o disminuir. En otras palabras, la matriz  $Q$  será determinada de forma experimental a través de pruebas para determinar el desempeño del filtro en cada caso.

Por último falta por definir los valores del vector de estado inicial  $x_0$  y la matriz inicial de covarianza del error estimado  $P_0$ . Los valores iniciales de  $x_0$  corresponderán a una medición instantánea adicional del parámetro RSSI de los 3 AP, la cual variará de punto en punto. Welch y Bishop (2006) y Marín (2011), indican que el valor  $P_0$  siempre será diferente de cero y de este valor dependerá que el filtro converja rápidamente, por lo que al igual que los autores se iniciará el filtro con  $P_0 = 1$ .

A continuación se indica una serie de pruebas que se realizaron para determinar los valores de la diagonal de la matriz  $Q$ , manteniendo constante los parámetros indicados anteriormente y siguiendo el procedimiento explicado por Marín (2011). Se escogió el punto 1A como referencia para las pruebas, en el cual para cada AP se efectuaron 10 mediciones del parámetro RSSI para luego ser procesadas por el filtro de Kalman. Ya que el filtro usa el mismo procedimiento para corregir el parámetro RSSI de los 3 AP's, el valor de los tres elementos de la diagonal de la matriz  $Q$  serán iguales.

Según los valores obtenidos de la matriz  $R$ , el valor aproximado de los elementos de la diagonal es 10, por lo que para la primera prueba se define  $Q = 10$ , para que sean del mismo orden. A continuación como menciona Marín (2011) se aumenta y disminuye  $Q$ , para determinar qué valor mejora el desempeño del filtro y del LPS, por lo que se varía  $Q$  en intervalos de 5 unidades, es decir  $Q = [0, 5, 15, 20]$ . Se descarta la opción  $Q = 0$ , ya que en este caso el filtro basa totalmente su estimación en la predicción del modelo y no toma en cuenta las mediciones del sensor. Los resultados de estas pruebas se visualizan en las Figuras 47, 48 y 49.

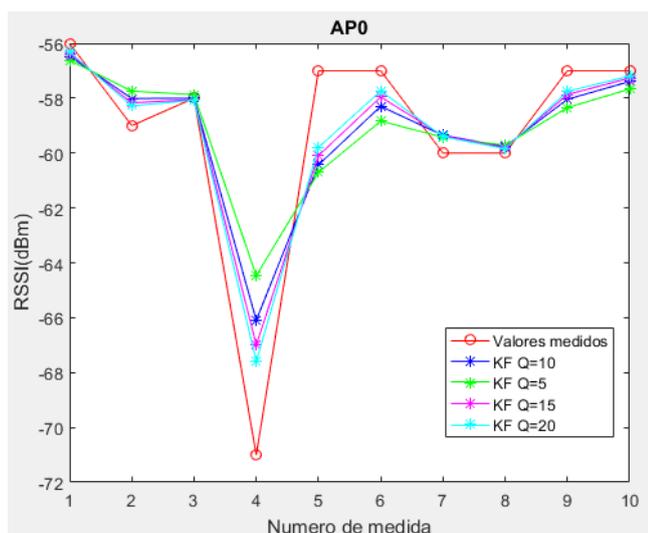


Figura 47: Resultados para AP-0 con el Filtro de Kalman variando  $Q$

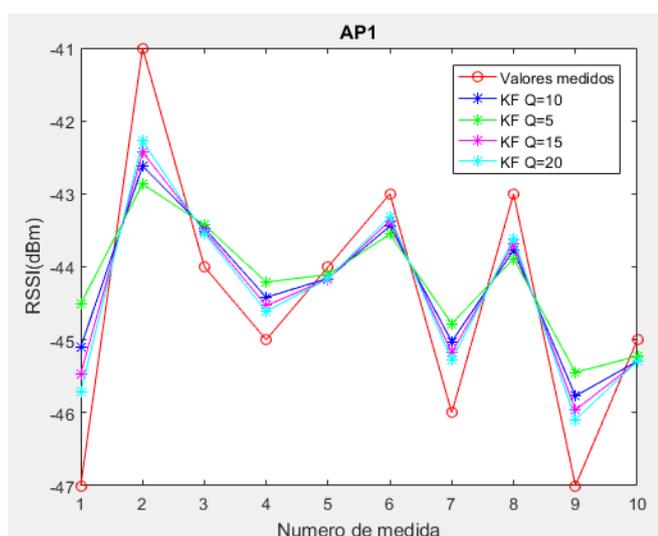


Figura 48: Resultados para AP-1 con el Filtro de Kalman variando  $Q$

Los resultados de las figuras comprueban lo que ya se había mencionado en la sección 2.1.2.1, ya que al ser  $R > Q$  ( $Q = 5$ ), el filtro se basa mayormente en la predicción del modelo por lo que los valores corregidos se alejan más de los valores medidos y cuando  $R < Q$  ( $Q = 15$  o  $Q = 20$ ), el filtro basa más su estimación en las mediciones del sensor, por lo que los valores corregidos se acercan más a los medidos. Se descartan los valores de  $Q \geq 20$  ya que con estos el filtro basa totalmente su estimación en las mediciones, por lo que no estaría cumpliendo su misión.

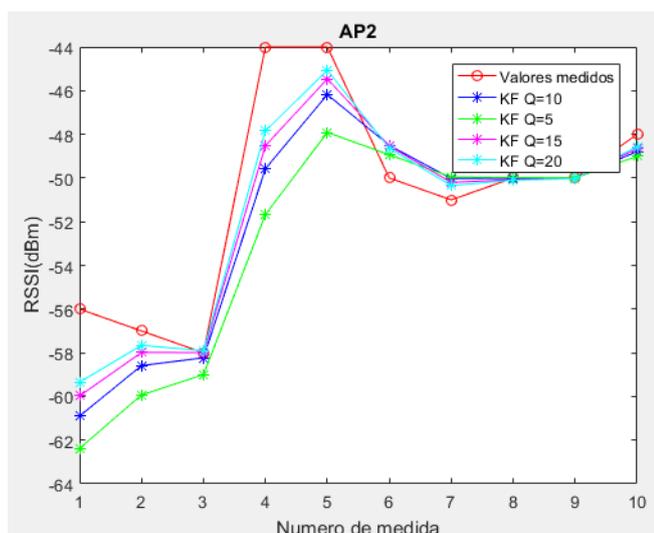


Figura 49: Resultados para AP-2 con el Filtro de Kalman variando  $Q$

Debido a que las pruebas realizadas en un solo punto no permiten determinar el desempeño completo del filtro de Kalman y del LPS, se procedió a realizar 10 pruebas por cada punto PPD, utilizando el algoritmo de validación de resultados para estimar la posición y el filtro de Kalman con diferentes valores de  $Q$  para corregir las mediciones. En la Tabla 24, se evidencian los resultados.

**Tabla 24**

**Resultados de las pruebas realizadas con diferentes valores de  $Q$**

Filtro de Kalman	$Q = 5$	$Q = 10$	$Q = 15$
	$R > Q$	$R \approx Q$	$R < Q$
PPD	PA (%)	PA (%)	PA (%)
1A	100	100	100
4E	30	30	60
8E	10	10	10
9E	30	0	0
12B	0	0	10
15C	10	10	10
17D	30	60	30
20E	30	50	40
23D	0	20	40
25E	10	40	70
28D	20	40	20
32C	40	30	20

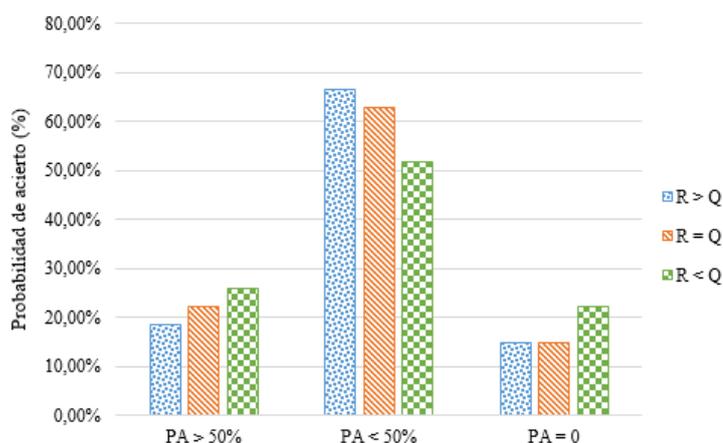
CONTINUÍA →

33C	100	100	100
36E	40	20	30
40E	20	30	0
41E	0	0	0
44E	20	30	40
47C	100	60	70
49B	10	10	0
51E	10	20	0
56A	40	40	50
57E	10	10	10
60E	60	30	10
64E	40	30	30
65C	0	0	0
68C	20	10	10
72E	100	100	100

De los resultados de la Tabla 24, donde se hicieron pruebas con la implementación del filtro de Kalman variando el parámetro  $Q$ , se evidencia que:

- Al configurar  $R > Q$ , el 18.52% de los puntos de prueba desconocidos alcanza una probabilidad de acierto mayor o igual al 50%, el 66.67% de los puntos tiene probabilidad de acierto menor al 50% y el 14.81% tiene probabilidad de acierto nula.
- Al configurar  $R \approx Q$ , el 22.22% de los puntos de prueba desconocidos alcanza una probabilidad de acierto mayor o igual al 50%, el 62.96% de los puntos tiene probabilidad de acierto menor al 50% y el 14.81% tiene probabilidad de acierto nula.
- Al configurar  $R < Q$ , el 25.93% de los puntos de prueba desconocidos alcanza una probabilidad de acierto mayor o igual al 50%, el 51.85% de los puntos tiene probabilidad de acierto menor al 50% y el 22.22% tiene probabilidad de acierto nula.

Estos resultados también se pueden visualizar en la Figura 50.



*Figura 50: Resultados de las pruebas realizadas con diferentes valores de  $Q$*

Del análisis se evidencia que cuando  $R < Q$  el porcentaje de PPD con  $PA \geq 50\%$  es mayor en comparación a los resultados de las otras consideraciones, pero también se logra obtener el mayor porcentaje de  $PA$  nula, por lo que se descarta esta opción. Por otro lado cuando  $R \approx Q$  y  $R > Q$  el porcentaje de PPD con  $PA$  nula es igual, sin embargo cuando  $R \approx Q$  se obtiene un mayor porcentaje de  $PA \geq 50\%$ , por lo que se concluye que el mejor desempeño del filtro de Kalman, con el algoritmo validación de resultados, se consigue al usar los valores de la diagonal de la matriz  $Q$  del mismo orden que los elementos de  $R$ .

### 3.3.5. Tiempo de detección de la posición

El tiempo de detección de la posición de un LPS en interiores es un aspecto de gran importancia, ya que de este dependerá que las estimaciones de la posición de un dispositivo móvil sean en tiempo real. Lo ideal es que el tiempo de detección sea menor a 1 s, para evitar que el dispositivo u objeto de interés cambie de posición antes de que su posición sea estimada.

En este proyecto de investigación, el tiempo de detección de la posición abarca al tiempo de medición del parámetro RSSI de los 3 AP's del escenario de pruebas y al tiempo de estimación, en el cual se realiza el procesamiento de las mediciones mediante el filtro de Kalman y se estima la posición con el algoritmo 2: validación de resultados. En la sección 3.2.3.2., se indicó que el Tiempo de medición del RSSI de

los 3 AP's para el presente LPS es aproximadamente 18 s, este tiempo se triplica ya que para el algoritmo de estimación seleccionado se requiere de tres conjuntos de mediciones. Por otro lado el tiempo de estimación de la posición es aproximadamente menor a 1 s.

De esto se concluye que el tiempo de detección de la posición del presente LPS en interiores es aproximadamente 55 s. Este intervalo de tiempo podría incrementar como se ya se mencionó en la sección 3.2.3.2, cuando por alguna razón no es posible medir el parámetro RSSI de algún AP. Se debe tener en cuenta que con este tiempo de detección, no será posible realizar estimaciones de la posición del dispositivo móvil en tiempo real, lo que limita al LPS.

### **3.3.6. Visualización de datos y posición estimada**

Una vez incluido el resultado final del LPS en interiores es posible visualizar en pantalla una tabla con los valores originales de cada medición y los valores corregidos mediante el filtro de Kalman, el tiempo que se requirió para cada medición del parámetro RSSI, el tiempo de estimación de la posición, el tiempo total de detección y las coordenadas X e Y de la posición estimada.

También se visualiza un plano a escala del área de pruebas del Laboratorio de Sistemas Avanzados de Telecomunicaciones, donde se identifican los 72 cuadrantes en que se encuentra dividida el área y la estimación de la posición del dispositivo móvil se representa a través de puntos dentro del mapa. En la Figura 51 se muestra un ejemplo de la tabla de valores del parámetro RSSI y la representación de la posición estimada en el plano.

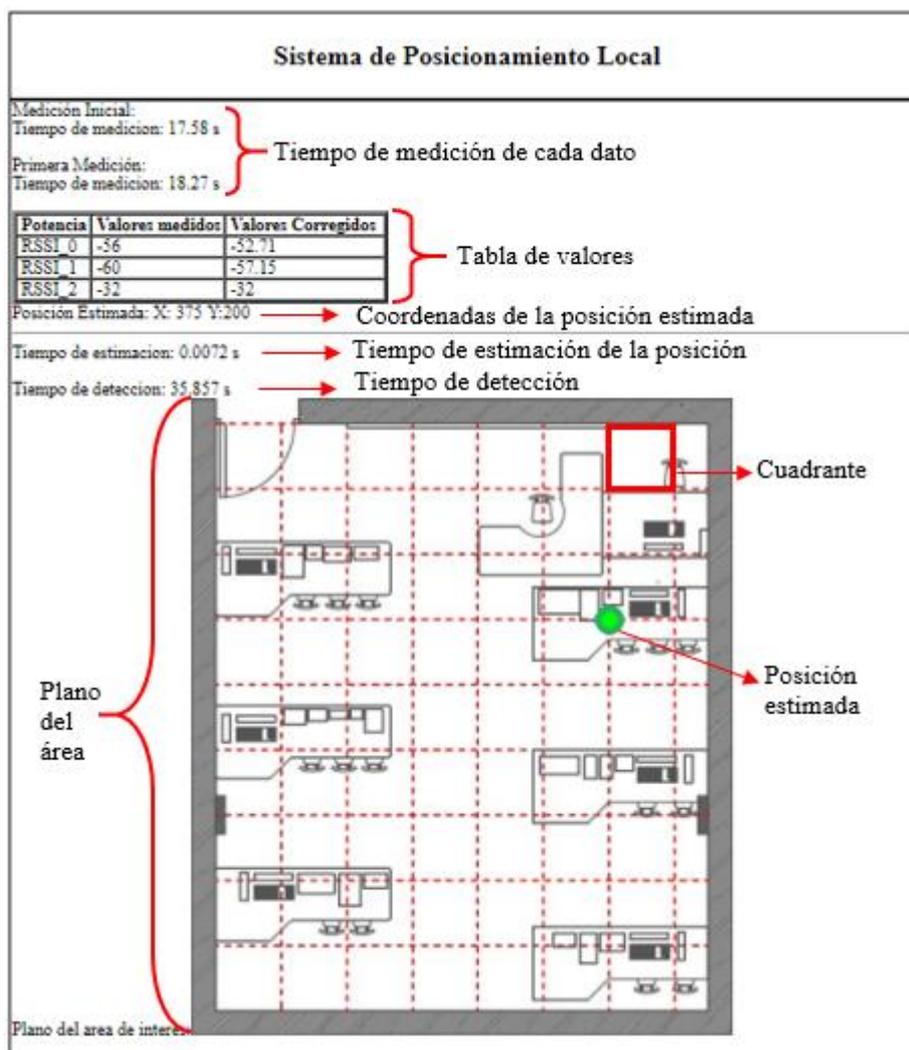


Figura 51: Visualización de datos y posición estimada del LPS

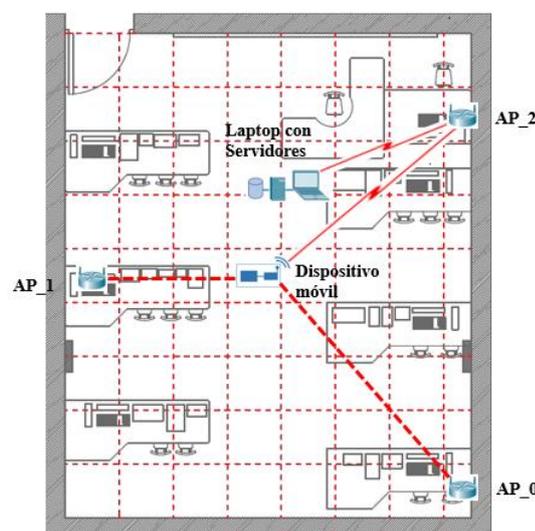
### 3.4. Implementación del Sistema de posicionamiento local en interiores

En esta sección se explica cómo se implementa el LPS en interiores para lograr visualizar en pantalla la ubicación del dispositivo móvil.

En cuanto al hardware, los AP's se han configurado como se indicó en la sección 3.2.1.1, deben mantener su ubicación y orientación constante. El módulo WiFi ESP8266-01 debe ser configurado en el modo 3 (para que trabaje como Cliente y AP) y debe conectarse inalámbricamente a la red DEEE\_02, para comunicarse con el servidor Web, esto solo debe ser configurado una vez.

Se sigue el diagrama de conexiones indicado en la Tabla 17 para que Arduino DUE obtenga los valores del parámetro RSSI medidos por el módulo WiFi, estas mediciones son enviadas a una base de datos de pruebas a través del servidor Web. El LPS corregirá cada uno de los valores medidos con el filtro de Kalman, para lograr estimar la posición con el algoritmo de validación de resultados.

Para el funcionamiento del sistema, el computador, el módulo WiFi ESP8266-01 y por ende Arduino DUE necesariamente deben estar conectados en la misma red, por esto, los tres elementos se conectarán inalámbricamente a la red DEEE\_02.



*Figura 52: Implementación del Sistema de posicionamiento local*

Es importante señalar que el servidor Web y la base de datos deben estar funcionando para que se posible recibir los valores del parámetro RSSI y almacenarlos. Posteriormente, después de que las mediciones pasen por el filtro de Kalman y por el algoritmo de validación de resultados, se visualiza en pantalla la posición estimada. Para acceder a la aplicación del LPS, se debe ingresar la siguiente dirección web en el navegador:

*[http://localhost/tutorial/lps\\_interiores.php](http://localhost/tutorial/lps_interiores.php)*

Finalmente en la Figura 52 se puede visualizar todos los elementos del LPS implementados.

### 3.5. Desarrollo de la Metodología de Pruebas

Todas las pruebas del LPS en interiores deben realizarse bajo las mismas condiciones, para evitar que existan nuevas interferencias u obstáculos que influyan en la medición del parámetro RSSI o aumente su variabilidad, lo que no permitiría realizar una correcta estimación de la posición. Para evitar todos estos inconvenientes se establece la siguiente metodología de pruebas general que siempre se debe seguir, tanto en la fase de entrenamiento como en la de pruebas. Cada uno de los aspectos considerados es consecuencia del análisis del parámetro RSSI realizado en capítulos anteriores.

#### A. Metodología general de pruebas

A continuación se enumeran una serie de condiciones que se deben establecer y verificar antes de interactuar con el LPS en interiores.

- El LPS únicamente será evaluado dentro del área de pruebas especificada.
- Evitar mover los elementos o equipos existentes dentro del área de pruebas, es decir sillas, escritorios, equipos de medición, computadores, etc.
- Realizar las mediciones del parámetro RSSI cuando no existan más personas a excepción de quien gestiona el LPS dentro del área de pruebas, la orientación del módulo WiFi ESP8266-01 es siempre hacia el Este, no existen otros dispositivos inalámbricos conectados y la puerta del laboratorio permanece cerrada.
- La persona que se encuentra dentro del área de pruebas, gestionando el LPS, debe evitar estar en movimiento.
- Garantizar que los 3 puntos de acceso estén configurados en diferentes canales de frecuencia, es decir AP-0 en el canal 2, AP-1 en el canal 8 y AP-2 en el canal 5. En cuanto a su orientación y ubicación, el AP-0 se ubica en el centro del cuadrante 72 y su antena es orientada hacia el Norte, AP-1 en el centro del cuadrante 33 orientado hacia el Oeste y AP-2 en el centro del cuadrante 16 hacia el Este.

- Las mediciones serán realizadas a nivel del piso, a excepción de los lugares donde no sea posible hacerlo debido a que existe algún obstáculo en el punto de prueba. En este caso se medirá el parámetro RSSI sobre dicho obstáculo.
- Usar el mismo módulo WiFi ESP8266-01 durante toda la ejecución del LPS.

### **3.5.1. Metodología de pruebas para el Algoritmo 1: Implementación de condiciones**

Los pasos que se deben seguir para la ejecución del algoritmo 1, implementación de condiciones junto al filtro de Kalman, son los siguientes:

- Iniciar servidores, AP's y dispositivos.
- Verificar la conexión inalámbrica entre el módulo WiFi y el computador.
- Medir el parámetro RSSI de los tres AP's (AP-0, AP-1 y AP-2), siguiendo la metodología general de pruebas, la cual servirá como estado inicial del filtro de Kalman.
- Realizar nuevamente la medición del parámetro RSSI de los 3 AP's, para estimar la posición.
- Corregir los valores medidos a través del filtro de Kalman.
- Estimar la posición con el algoritmo de implementación de condiciones.

### **3.5.2. Metodología de pruebas para el Algoritmo 2: Validación de resultados**

Los pasos para la ejecución del LPS, utilizando el algoritmo 2, validación de resultados, son los siguientes:

- Iniciar servidores, AP's y dispositivos.
- Verificar la conexión inalámbrica entre el módulo WiFi y el computador.
- Medir el parámetro RSSI de los tres AP's siguiendo la metodología general de pruebas, la cual servirá como estado inicial para el filtro de Kalman.
- Realizar nuevamente la medición del parámetro RSSI de los 3 AP's.
- Corregir los valores medidos a través del filtro de Kalman.

- Estimar la posición del dispositivo móvil con el algoritmo de validación de resultados y según estos resultados determinar si se necesita de una nueva medición.
- Realizar una nueva medición del parámetro RSSI de los 3 AP's, si fuese necesario. Procesar los valores por el filtro de Kalman y nuevamente estimar la posición con el algoritmo de validación de resultados. Este procedimiento se realizará máximo dos veces, hasta lograr estimar la posición del dispositivo móvil.

### **3.5.3. Metodología de pruebas para el Algoritmo 3: Validación de resultados con implementación de condiciones**

Los pasos para la ejecución del LPS, con el algoritmo 3 que emplea la validación de resultados con implementación de condiciones, son los siguientes:

- Iniciar servidores, AP's y dispositivos.
- Verificar la conexión inalámbrica entre el módulo WiFi y el computador.
- Medir el parámetro RSSI de los 3 AP's, siguiendo la metodología general de pruebas, la cual servirá como estado inicial del filtro de Kalman.
- Realizar nuevamente la medición del parámetro RSSI de los 3 AP's.
- Corregir los valores medidos a través del filtro de Kalman.
- Estimar la posición con el algoritmo 3, validación de resultados con implementación de condiciones, y según estos resultados determinar si se necesita de una nueva medición.
- Realizar una nueva medición del parámetro RSSI de los 3 AP's, si fuese necesario. Procesar los valores por el filtro de Kalman y nuevamente estimar la posición con el algoritmo 3. Este procedimiento se realizará máximo dos veces, para lograr estimar la posición del dispositivo móvil.

### 3.5.4. Metodología de pruebas para el posicionamiento dinámico del dispositivo móvil

Los pasos para estimar la posición del dispositivo móvil cuando este se encuentra en movimiento, son los siguientes:

- Iniciar servidores, AP's y dispositivos.
- Verificar la conexión inalámbrica entre el módulo WiFi y el computador.
- Establecer una trayectoria conformada por 9 puntos a través del área de interés, para la primera prueba. El dispositivo móvil deberá seguir esta trayectoria.
- Medir el parámetro RSSI de los 3 AP's en el primer punto de prueba de la trayectoria (punto inicial), siguiendo la metodología general de pruebas, la cual servirá como estado inicial del filtro de Kalman.
- Medir el parámetro RSSI de los 3 AP's en el segundo punto de la trayectoria. Proyectar estas mediciones hacia el siguiente punto mediante el filtro de Kalman tomando en cuenta los resultados del punto de prueba anterior. Finalmente estimar la posición usando las proyecciones del filtro en el algoritmo validación de resultados, para lo cual se sigue la metodología de pruebas del algoritmo 2.
- Realizar el procedimiento indicado anteriormente en los 7 puntos restantes de la trayectoria, tratando de predecir la siguiente posición del dispositivo móvil.
- Repetir la primera prueba tres veces para comparar los resultados obtenidos.
- Escoger 5 puntos de la trayectoria definida anteriormente, los cuales se encuentran distanciados uno de otro aproximadamente 1.6 m para la segunda prueba. El punto inicial no cambia por lo que se escogen los cuatro puntos restantes a partir de este.
- Medir el parámetro RSSI de los 3 AP's en el punto de prueba inicial de la trayectoria, siguiendo la metodología general de pruebas, la cual servirá como estado inicial del filtro de Kalman.
- Medir el parámetro RSSI de los 3 AP's en el segundo punto de prueba de la trayectoria (conformada por 5 puntos). Proyectar estas mediciones hacia el siguiente punto mediante el filtro de Kalman tomando en cuenta los resultados del punto de prueba anterior. Finalmente estimar la posición usando las

proyecciones del filtro en el algoritmo validación de resultados, para lo cual se sigue la metodología de pruebas del algoritmo 2.

- Realizar el procedimiento indicado anteriormente en los 3 puntos restantes de la trayectoria, para tratar de predecir la tendencia del movimiento del dispositivo móvil.
- Repetir la segunda prueba tres veces para comparar los resultados obtenidos del movimiento del dispositivo.

## CAPÍTULO 4

### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

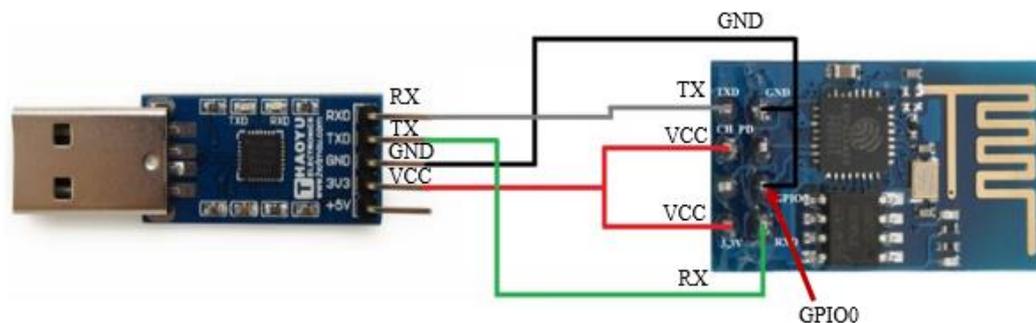
#### 4.1. Pruebas preliminares

En el presente capítulo, se detallan las pruebas preliminares del Hardware y Software del LPS implementado, las cuales consisten en actualizar el firmware del módulo WiFi, verificar su comunicación con los comandos AT, comprobar el tiempo de medición del parámetro RSSI, el tiempo de detección de la posición, la probabilidad de acierto y el posicionamiento estático y dinámico.

##### 4.1.1. Hardware

##### 4.1.1.1. Prueba inicial

El módulo WiFi ESP8266-01 antes de ser configurado requiere de una actualización del Firmware, para corregir errores, establecer la velocidad de transmisión de datos y añadir nuevas prestaciones o características.



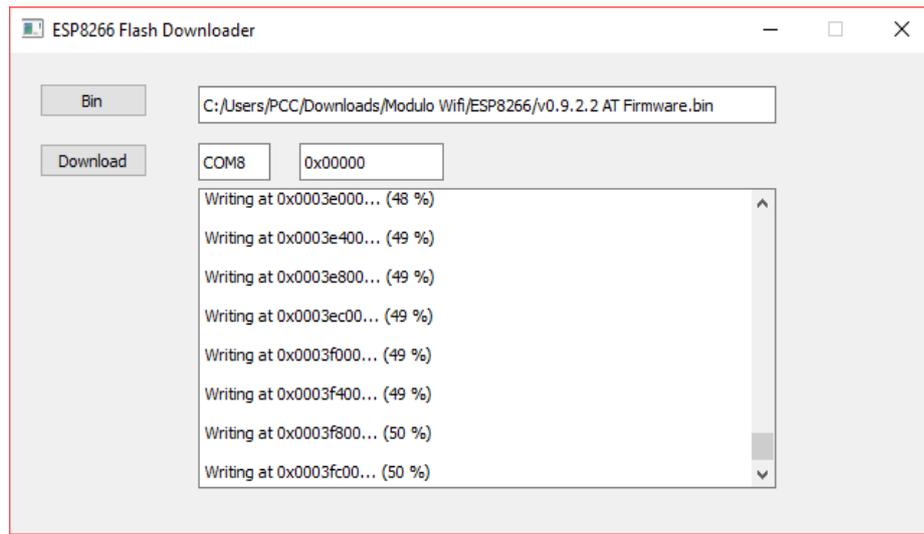
*Figura 53: Conexión para la actualización del firmware del módulo ESP8266-01*

Para este procedimiento como lo indica Prometec (2016), el pin GPIO0 del módulo fue conectado a GND (0V) para que sea posible la actualización del Firmware (Modo UART). Además se requiere de los siguientes elementos:

- ESP8266\_flasher: Programa oficial para la actualización del firmware.
- Firmware versión 0.9.2.2: Archivo actualizado con extensión bin.

- Adaptador USB a serial: Permite conectar el módulo WiFi con el computador que ejecuta el programa para actualizar el firmware.

La Figura 53 muestra las conexiones para la actualización del firmware y en la Figura 54 se visualiza el programa utilizado para este fin.



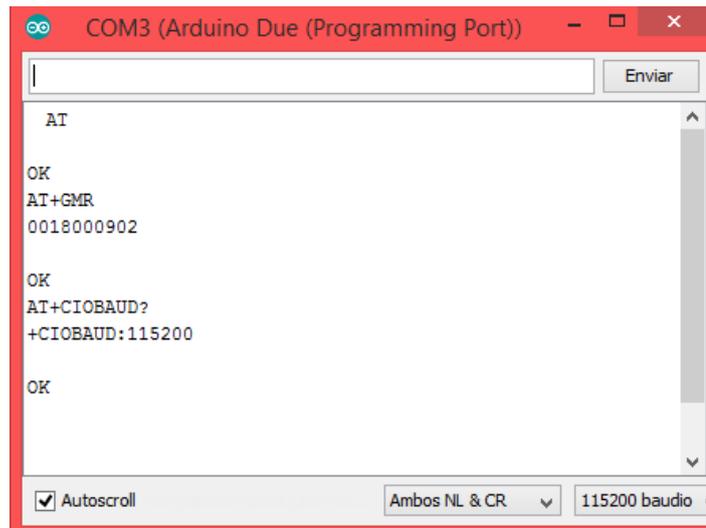
*Figura 54: Programa ESP8266\_flasher*

Luego de esta actualización se asegura que el módulo WiFi trabaja a una velocidad de transmisión de datos de 115 200 baudios y su funcionamiento no contiene errores, por lo que se puede proceder a programarlo a través del IDE de Arduino DUE.

#### **4.1.1.2. Prueba de ejecución de los comandos AT**

Es importante comprobar que es posible interactuar con el módulo WiFi ESP 8266-01 a través de los comandos AT desde el monitor serial de Arduino DUE. Para esto, se verifica el correcto funcionamiento del módulo, la versión del firmware instalada y la velocidad de transmisión de datos con los siguientes comandos AT:

- AT
- AT+GMR
- AT+CIOBAUD?



*Figura 55: Ejecución de comandos AT*

Los resultados de esta prueba se indican en la Figura 55, donde se evidencia que el módulo WiFi responde a todos los comandos AT ejecutados, lo que significa que es posible la comunicación del módulo a través de estos. Además se comprueba que el módulo ESP8266-01 funciona correctamente, la versión del firmware es 0018000902 y la velocidad de transmisión de datos es de 115200 baudios.

## **4.1.2. Software**

### **4.1.2.1. Transmisión de Información**

Una de las funciones principales para el desarrollo del LPS en interiores es la transmisión de la información, por lo que esta prueba será clave para asegurar que los valores del parámetro RSSI medidos por el módulo WiFi son los mismos que llegan a la base de datos y al servidor Web. Para esta prueba se realizó una medición del parámetro RSSI y los resultados se visualizan en las Figuras 56, 57 y 58.

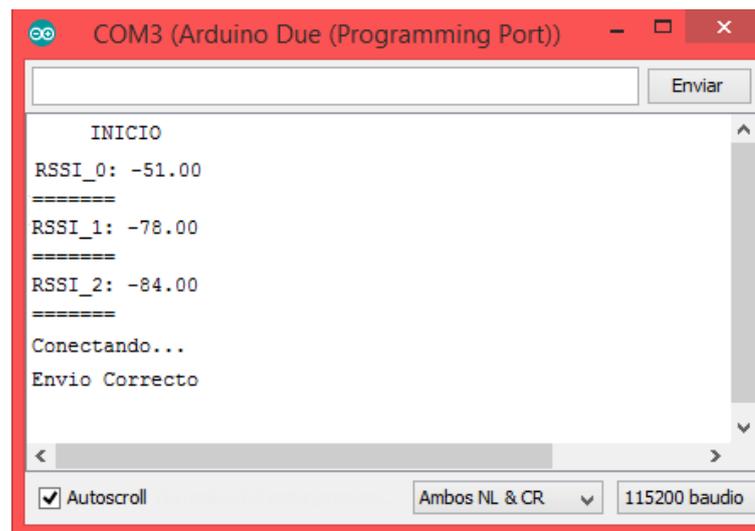


Figura 56: Valores medidos del parámetro RSSI en el monitor serial de Arduino

En la Figura 56 se observan desde el monitor serial de Arduino los valores del parámetro RSSI medidos por el módulo ESP8266-01 para los 3 AP's. Además se indica que los valores fueron enviados correctamente al servidor Web.

Por otro lado en la Figura 57, se indican los valores del parámetro RSSI para cada AP almacenados en la base de datos, el número identificador (Id) y el tiempo que se requirió para cada medición. Finalmente en la Figura 58 se observa la aplicación Web preliminar del LPS con los 3 valores del parámetro RSSI medidos, el tiempo de medición y los valores corregidos mediante el filtro de Kalman.

Id	RSSI_0	RSSI_1	RSSI_2	Tiempo_medicion
1610	-45	-43	-50	17.52
1611	-54	-37	-43	18.23
1612	-51	-78	-84	18.01

Figura 57: Valores medidos del RSSI en la base de datos

Como se observa en los resultados, los valores del parámetro RSSI medidos son los mismos tanto en el monitor serial de Arduino DUE, la base de datos y la aplicación Web; lo que garantiza que la información se transmite correctamente.

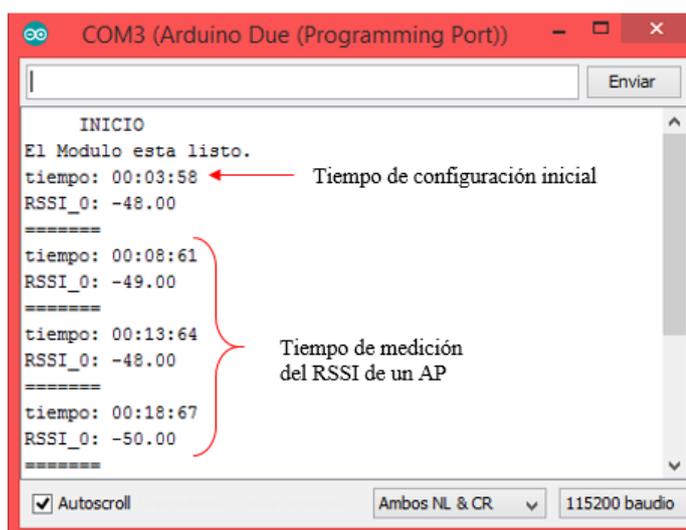


Potencia	Valores medidos	Valores Corregidos
RSSI_0	-51	-50.06
RSSI_1	-78	-66.62
RSSI_2	-84	-58.53

Figura 58: Valores medidos del RSSI en la aplicación Web

#### 4.1.2.2. Tiempo de medición del RSSI

Es importante comprobar el tiempo de medición del parámetro RSSI de los AP's especificado en la sección 3.2.3.2, considerando que el módulo WiFi se encuentra configurado como cliente – AP (modo 3) y conectado a la red DEEE\_02 para realizar las siguientes pruebas:



```

COM3 (Arduino Due (Programming Port))
INICIO
El Modulo esta listo.
tiempo: 00:03:58 ← Tiempo de configuración inicial
RSSI_0: -48.00
=====
tiempo: 00:08:61
RSSI_0: -49.00
=====
tiempo: 00:13:64
RSSI_0: -48.00
=====
tiempo: 00:18:67
RSSI_0: -50.00
=====
Autoscroll Ambos NL & CR 115200 baudio

```

Figura 59: Tiempo de medición del RSSI de un AP

La primera prueba, consiste en determinar el tiempo de medición del parámetro RSSI de un único AP. En la Figura 59 se indican los resultados de esta prueba, donde

se evidencia que el intervalo de tiempo entre cada medición del parámetro RSSI de un solo AP es alrededor de 4 o 5 s. Además, en este caso el módulo WiFi se demora alrededor de 4 s en realizar las configuraciones iniciales antes de comenzar a medir, tiempo que es aleatorio y no tiene relevancia en estas pruebas.

La segunda prueba consiste en determinar el tiempo de medición del parámetro RSSI de los 3 AP's del escenario de pruebas (AP-0, AP-1 y AP-2). En la Figura 60 se muestran los resultados de la prueba, donde se indica que el tiempo de medición del parámetro RSSI de los 3 AP's es alrededor de 15 s como era de esperarse ya que se triplica el tiempo de medición del parámetro RSSI de un AP's.

```

COM3 (Arduino Due (Programming Port))
|
|
| INICIO
| El Modulo esta listo.
| tiempo: 00:02:02 ← Tiempo de configuración inicial
| RSSI_0: -49.00
| =====
| RSSI_1: -69.00
| =====
| RSSI_2: -67.00
| =====
| tiempo: 00:17:09 ← Tiempo de medición del
| RSSI de los 3AP's
|
|
| [Autoscroll] [Ambos NL & CR] [115200 baudio]

```

*Figura 60: Tiempo de medición del RSSI de los 3 AP's*

La tercera prueba consiste en determinar el intervalo de tiempo en que los datos medidos del parámetro RSSI de los 3 AP's son enviados al servidor Web, para luego ser almacenados en la base de datos Fingerprints de entrenamiento o de pruebas según corresponda. El resultado se indica en la Figura 61, donde se observa que el intervalo de tiempo en medir, procesar y enviar al servidor Web los valores del parámetro RSSI de los 3 AP's es alrededor de 18 s. Por lo que se deduce que el periodo de tiempo en procesar y enviar los datos al servidor Web es aproximadamente 3 s.

```

COM3 (Arduino Due (Programming Port))
Enviar
INICIO
El Modulo esta listo.
tiempo: 00:02:80
RSSI_0: -56.00
=====
RSSI_1: -72.00
=====
RSSI_2: -68.00
=====
Conectando...
Conexion correcta
Envio Correcto
tiempo: 00:20:41
Autoscroll Ambos NL & CR 115200 baudio

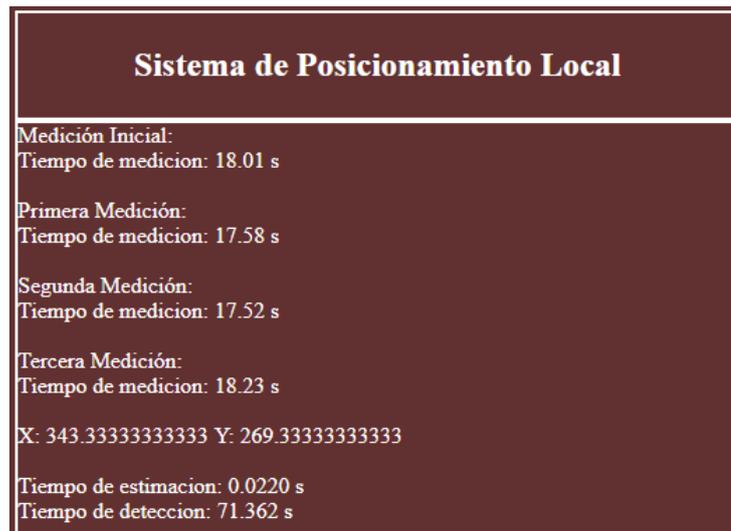
```

*Figura 61: Tiempo de envío de datos al servidor Web*

Con estas pruebas se verifica que el intervalo de Tiempo de medición del RSSI (especificado en la sección 3.2.3.2) es alrededor de 18 s, tiempo en el cual se mide el parámetro RSSI de los 3 AP's (AP\_0, AP\_1 y AP\_2), se procesan las mediciones para ser visualizadas en pantalla y se envían al servidor Web del Sistema de Posicionamiento Local en interiores.

#### **4.1.2.3. Tiempo de detección de la posición**

Esta prueba consiste en determinar el tiempo de detección de la posición del dispositivo móvil, especificado en la sección 3.3.5., para lo cual se requiere del tiempo de medición de los 4 conjuntos de datos del parámetro RSSI (incluida la medición inicial del filtro de Kalman) y el tiempo de estimación del algoritmo 2: validación de resultados. En la Figura 62 se indican los resultados de esta evaluación, donde se comprueba que el Tiempo de medición del RSSI es aproximadamente 18s para los 3 AP's como se determinó en la sección anterior. Además se evidencia que el tiempo de estimación del algoritmo 2 es menor a 1 s (aproximadamente 22 ms). Por lo tanto el tiempo de detección de la posición del LPS que emplea la técnica Fingerprints, el filtro de Kalman y el algoritmo validación de resultados es aproximadamente 71 s (1 min con 11 s).



*Figura 62: Tiempo de detección de la posición*

Con este análisis se comprueba que no es posible realizar estimaciones de la posición del dispositivo móvil en tiempo real con el LPS desarrollado en este proyecto de investigación, ya que el tiempo de detección de la posición es mayor a 60 s y en este tiempo es posible que los dispositivos móviles (robots cooperativos) cambien de posición o que se desplacen por toda el área del escenario de pruebas.

## **4.2. Pruebas del Sistema de Posicionamiento Local en interiores**

### **4.2.1. Posicionamiento**

Las pruebas realizadas para determinar cómo trabaja el sistema de posicionamiento local en interiores con la técnica Fingerprints, los diferentes algoritmos de estimación y el filtro de Kalman, se detallan a continuación considerando que la base de datos Fingerprints construida con el rango de variación más probable será utilizada para realizar las comparaciones con las nuevas mediciones del parámetro RSSI.

#### **4.2.1.1. Posicionamiento estático**

Para realizar las pruebas del posicionamiento estático con cada uno de los algoritmos de estimación de la posición, se escoge el punto 20E como punto de prueba desconocido (es decir que se supone desconocida su posición y se la pretende estimar),

donde se realizan las mediciones del parámetro RSSI. Por otro lado para el filtro de Kalman, primero se realiza una medición del parámetro RSSI de los 3 AP's en el punto PPD definido, que es usada como el estado inicial del filtro para las siguientes pruebas.

#### A. Prueba 1: Implementación de condiciones

Para el algoritmo 1: Implementación de condiciones, siguiendo la metodología de pruebas indicada en la sección 3.5.1, se realizó una sola medición del parámetro RSSI de los 3 AP's durante 18s, cuyos valores pasan por el filtro de Kalman, la técnica Fingerprints y por el algoritmo de estimación, dando como resultado 5 puntos estimados, como se observa en la Figura 63, que indican las posibles posiciones del dispositivo móvil (puntos rojos).



Figura 63: Estimación de la posición con el algoritmo 1

También se puede observar en la Figura 63, que ninguno de los puntos que estiman la posición coinciden exactamente con la posición real del dispositivo móvil (punto amarillo) o están a 0.8m de distancia. Con estos resultados se comprueba que el algoritmo 1, no permite realizar una correcta estimación de la posición, debido a su baja precisión y alta incertidumbre.

### B. Prueba 2: Validación de resultados

La segunda prueba emplea el algoritmo 2: Validación de resultados para estimar la posición siguiendo la metodología de pruebas indicada en la sección 3.5.2, para la cual se realizaron 3 mediciones del parámetro RSSI de los 3 AP's durante 54s en el mismo punto de prueba. En la Figura 64, se pueden observar los resultados, donde los puntos rojos representan a los resultados de la primera medición, los puntos azules a los resultados de la segunda medición y los puntos naranjas, a los resultados de la tercera medición.

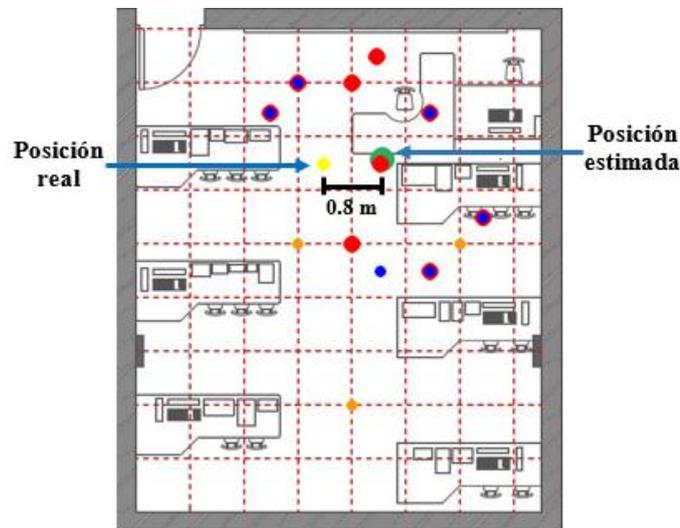


Figura 64: Estimación de la posición con el algoritmo 2

Como se observa en la Figura 64, existen 5 puntos coincidentes entre la primera y segunda medición (puntos azules con bordes rojos), sin embargo no existe ningún punto coincidente con la tercera medición. Por lo que en este caso, se promedian las coordenadas X e Y de los 5 puntos coincidentes para obtener un solo punto que estime la posición. La posición estimada (punto verde) se encuentra a 0.8m de la posición real del dispositivo móvil, es decir que el error de la estimación es aceptable para el sistema.

De los resultados se concluye que este algoritmo de estimación requiere de más tiempo de medición, su precisión es de 0.8m de distancia y permite obtener un solo punto que estime la posición del objetivo móvil.

### C. Prueba 3: Validación de resultados con implementación de condiciones

Para esta prueba se utiliza el algoritmo 3: Validación de resultados con implementación de condiciones y se sigue la metodología de pruebas indicada en la sección 3.5.3, para la cual se realizaron 3 mediciones del parámetro RSSI de los 3 AP's durante 54s en el mismo punto de prueba. Los resultados de esta prueba se indican en la Figura 65, los puntos rojos son los resultados de la primera medición, los puntos azules son de la segunda medición y los puntos naranjas, de la tercera medición.

Debido a que con este algoritmo el área de pruebas se divide en tres secciones, el número de puntos resultantes de cada medición disminuye en comparación a los resultados de la prueba anterior. Por lo que existen 3 puntos coincidentes entre la primera y segunda medición (puntos azules con bordes rojos), el único punto resultante de la tercera medición no coincide con otro punto. En esta ocasión para determinar la posición se escoge el punto coincidente entre la primera y segunda medición más cercano al punto resultante de la tercera medición (punto naranja).

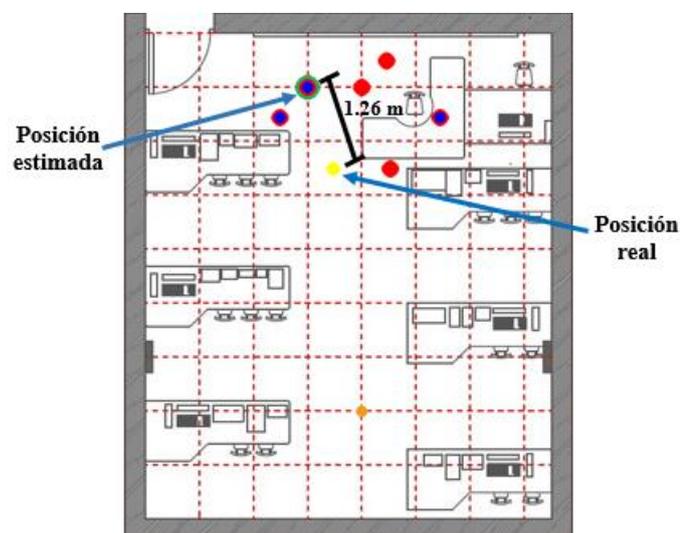


Figura 65: Estimación de la posición con el algoritmo 3

La posición estimada con este algoritmo (punto rojo, azul y verde) está a más de 0.8 m de distancia de la posición real del dispositivo móvil, por lo que es una estimación incorrecta.

De los resultados se evidencia que los algoritmos 2 y 3 requieren de mayor tiempo de medición (54 s), logran obtener un solo punto que represente a la posición estimada pero su precisión podría sobrepasar el error propuesto para el actual LPS en interiores.

#### *D. Conclusión*

Después del análisis realizado de las tres pruebas anteriores, se concluye que el LPS en interiores tiene mejor desempeño al emplear el algoritmo de validación de resultados. Este algoritmo toma alrededor de 54 s en realizar 3 mediciones del parámetro RSSI de los 3 AP's y logra estimar la posición del dispositivo móvil con un solo punto.

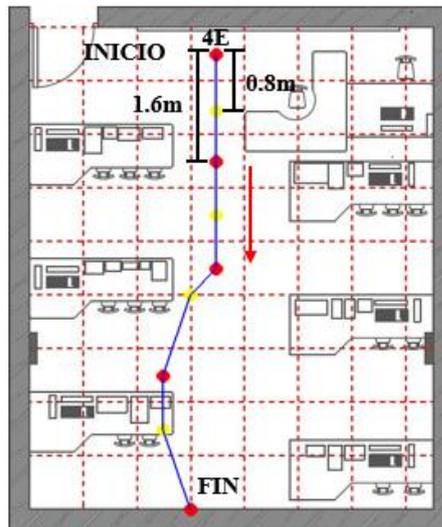
#### **4.2.1.2. Posicionamiento dinámico**

A pesar de que el presente proyecto de investigación se centra en estimar la posición estática de un dispositivo móvil, se realizaron varias pruebas para determinar el comportamiento del sistema cuando el terminal o dispositivo se encuentra en movimiento. El objetivo de esta prueba es pretender predecir la posición futura del dispositivo móvil con la información de las mediciones a priori mediante el filtro de Kalman.

Para esta prueba se siguió la metodología señalada en la sección 3.5.4., y de acuerdo a esta se definió una trayectoria a través del área de pruebas que se puede visualizar en la Figura 66. La ubicación de los 9 puntos de prueba (rojos y amarillos) que conforman a la trayectoria corresponde a la parte central del escenario, ya que es donde más problemas de precisión existen; es decir que se evaluó la peor ruta. Además en esta sección del área de pruebas se encuentran menos obstáculos, por lo que el robot o dispositivo móvil puede moverse con libertad sobre el piso.

Se debe considerar que el LPS emplea el algoritmo de validación de resultados para estimar la posición, por lo que se requieren 3 mediciones del parámetro RSSI para cada AP en cada uno de los puntos de prueba. Las tres mediciones toman alrededor de 54s en un mismo punto de prueba, en este tiempo el dispositivo móvil podría cambiar de

posición dependiendo de la velocidad de desplazamiento, por lo que es importante evaluar si es preferible usar una trayectoria conformada por 9 o 5 puntos de prueba, ya que de esto dependerá el número de mediciones del parámetro RSSI en toda la trayectoria y por ende del tiempo de medición.



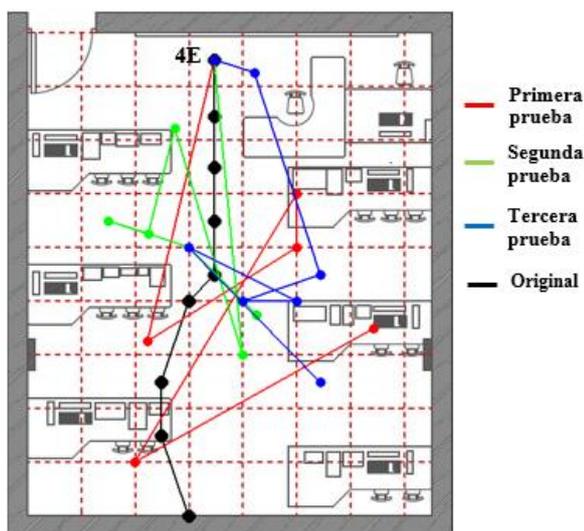
*Figura 66: Trayectoria trazada*

Es importante mencionar que el punto 4E es el inicio de la trayectoria, por lo que sus coordenadas se consideran conocidas y en este punto se toman las mediciones del parámetro RSSI para el estado inicial del filtro de Kalman.

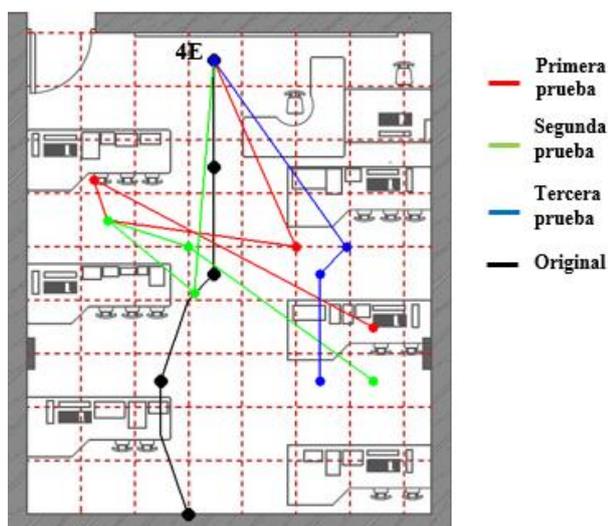
Según la metodología de pruebas señalada, se indica que la primera prueba consiste en realizar mediciones del parámetro RSSI de los 3 AP's en los 9 puntos que conforman la trayectoria para tratar de predecir el movimiento del dispositivo. Este procedimiento se repite 3 veces y los resultados de las pruebas se muestran en la Figura 67.

A pesar de que la trayectoria original se conforma de 9 puntos de prueba, se puede observar en la Figura 67 que las trayectorias resultantes se conforman por 6 o 7 puntos; esto se debe a que con ciertas mediciones no es posible estimar la posición en esos puntos. Los resultados también permiten visualizar que no es posible realizar la predicción del movimiento del dispositivo ya que las estimaciones de la posición se

alejan totalmente de los 9 puntos de la trayectoria original. El tiempo empleado en realizar las mediciones y estimaciones en los 9 puntos de pruebas de la trayectoria es alrededor de 8 min con 6 s, tiempo elevado y desfavorable para el presente LPS ya que es probable que el dispositivo móvil recorra toda el área de interés en menor tiempo.



*Figura 67: Resultados de la estimación del movimiento del objetivo en una trayectoria conformada por 9 puntos*



*Figura 68: Resultados de la estimación del movimiento del objetivo en una trayectoria conformada por 5 puntos*

La segunda prueba señalada en la metodología, consiste en realizar mediciones del parámetro RSSI de los 3 AP's en los 5 puntos de la trayectoria (puntos rojos de la

Figura 66), para proyectar las posiciones futuras. Este procedimiento al igual que la prueba anterior se repite 3 veces y los resultados son visualizados en la Figura 68.

Los resultados demuestran que aunque la trayectoria tiene menos puntos que la anterior, es también imposible predecir la tendencia del movimiento del dispositivo. Por otro lado también existen puntos que no pudieron ser determinados con las mediciones obtenidas. El tiempo empleado para realizar las mediciones y estimaciones en los 5 puntos de pruebas de esta trayectoria todavía es desfavorable para el LPS, ya que es alrededor de 4 min con 30 s.

#### *A. Conclusión*

Se comprobó mediante las pruebas ejecutadas que no es posible realizar la predicción del movimiento del dispositivo a través de una trayectoria conformada por 5 o 9 puntos de prueba con el presente sistema de posicionamiento local en interiores. Una de las razones podría ser la cantidad de tiempo de medición del parámetro RSSI en un solo punto de prueba, ya que es probable que un robot o dispositivo móvil cambie de posición o recorra toda el área de pruebas en 54 s. Además el LPS cuenta con escasa información del movimiento del dispositivo, ya que el sistema solo cuenta con un sensor para medir el parámetro RSSI y no es posible determinar el cambio de orientación.

#### **4.2.2. Probabilidad de acierto del posicionamiento**

Esta prueba consiste en comparar los resultados de la probabilidad de acierto (PA) de los 27 puntos de prueba desconocidos (PPD) al ejecutar el LPS con y sin la implementación del filtro de Kalman, para determinar si el filtro ayuda a mejorar la estimación de la posición. Esta comparación se visualiza en la Tabla 25.

**Tabla 25**  
**Resultados de las pruebas realizadas con y sin el filtro de Kalman**

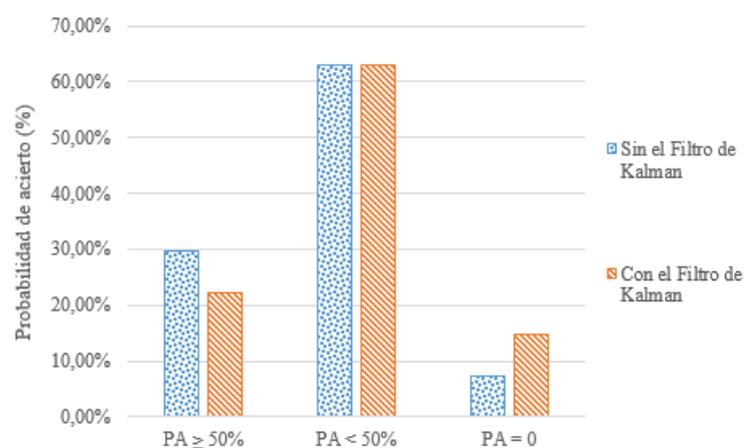
<b>LPS</b>	<b>Sin el filtro de Kalman</b>	<b>Con el filtro de Kalman</b>
PPD	PA (%)	PA (%)
1A	50	100
4E	20	30
8E	30	10
9E	0	0
12B	20	0
15C	20	10
17D	10	60
20E	20	50
23D	70	20
25E	90	40
28D	0	40
32C	70	30
33C	100	100
36E	30	20
40E	10	30
41E	30	0
44E	20	30
47C	50	60
49B	10	10
51E	10	20
56A	20	40
57E	10	10
60E	10	30
64E	70	30
65C	20	0
68C	10	10
72E	100	100

Los resultados señalan que:

- Al usar el LPS sin el filtro de Kalman, el 29.63% de los puntos de prueba desconocidos alcanzan una probabilidad de acierto mayor o igual al 50%, el 62.96% de los puntos logran una probabilidad de acierto menor al 50% y tan solo el 7.41% tiene probabilidad de acierto nula.

- Al usar el LPS con el filtro de Kalman implementado, el 22.22% de los puntos de prueba desconocidos alcanza una probabilidad de acierto mayor o igual al 50%, el 62.96% de los puntos tiene probabilidad de acierto menor al 50% y el 14.81% tiene probabilidad de acierto nula.

En la Figura 69 se visualiza la comparación de los resultados de la PA al implementar el LPS con y sin el filtro de Kalman.



*Figura 69: Resultados de las pruebas del LPS con y sin el Filtro de Kalman*

Se evidencia que sin la implementación del filtro de Kalman se logra un mayor porcentaje de PPD con probabilidad de acierto mayor o igual al 50% y un menor porcentaje de probabilidad de acierto nula, en contraposición a los resultados obtenidos cuando si se implementa el filtro. De este análisis se concluye que la implementación del filtro de Kalman no logra mejorar la estimación de la posición del dispositivo móvil al usar el presente LPS en interiores.

## CAPÍTULO 5

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- El módulo WiFi ESP8266-01 ofrece capacidades de comunicación inalámbrica a otros sistemas, permite medir el parámetro RSSI de diferentes redes inalámbricas activas y puede ser fácilmente implementado en otros dispositivos como robots móviles cooperativos; lo que benefició a la implementación del sistema de posicionamiento local en interiores.
- La técnica *Fingerprints* facilita la implementación del sistema de posicionamiento local en interiores, ya que evita el complicado modelamiento de la propagación de la señal RF de las diferentes redes inalámbricas activas dentro del área de interés.
- Se comprobó que además del canal de comunicaciones, los obstáculos e interferencias que modifican el comportamiento del parámetro RSSI en ambientes interiores, también influyen el canal de frecuencia de los puntos acceso (desde los cuales se envía la señal WiFi), la direccionalidad de la antena del módulo WiFi y la presencia de personas dentro del área de interés.
- Se constató que no existe una relación lineal entre el parámetro RSSI y la distancia (entre el AP y el módulo WiFi), por el contrario, según las pruebas realizadas en este trabajo de investigación se denota que existe una relación tipo logarítmica entre ambos parámetros.
- El rango intercuartil o de variación más probable es el método más factible para definir los rangos de posibles valores para construir la base de datos *Fingerprints* para el sistema de posicionamiento local en interiores, ya que se evita que los posibles valores atípicos influyan de manera negativa en dichos rangos, lo que no se consigue al usar la media aritmética y la desviación estándar para definir los rangos.

- La principal desventaja del sistema de posicionamiento local en interiores es el considerable intervalo de tiempo de detección de la posición estimada, ya que es mayor a 60 segundos, por lo que no es factible usarlo para procedimientos en tiempo real, ya que en este tiempo el dispositivo puede haber cambiado de posición o recorrer toda el área de interés. Se debe tener en cuenta que el periodo de detección consta del tiempo de medición del parámetro RSSI, que es alrededor de 54 segundos y del tiempo de estimación de la posición, aproximadamente 22 ms.
- El sistema de posicionamiento local funciona mejor cuando se utilizan mediciones instantáneas del parámetro RSSI para la fase de pruebas; ya que así se evita incrementar aún más el tiempo de medición.
- El algoritmo de estimación de la posición del dispositivo móvil más factible para el sistema de posicionamiento local en interiores es la “validación de resultados”, ya que logra obtener un solo punto para estimar la posición, se reduce el porcentaje de probabilidad de acierto nula y aumenta el porcentaje de probabilidad de acierto mayor o igual al 50%, en contraposición a los resultados de los otros algoritmos propuestos.
- Se aplicó el filtro de Kalman en el sistema de posicionamiento local en interiores, con el fin de corregir las mediciones del parámetro RSSI y tratar de disminuir las variaciones, considerando que existe una relación lineal entre las mediciones del parámetro RSSI en un mismo punto de prueba para cada punto de acceso.
- Se evidenció que el sistema de posicionamiento local logra un mejor desempeño cuando los valores de las matrices  $Q$  y  $R$  del filtro de Kalman son del mismo orden, ya que de esta forma el filtro basa su estimación de manera similar en la predicción del modelo y en las mediciones del módulo WiFi.

- La implementación del filtro de Kalman en el sistema de posicionamiento local en interiores no logra mejorar la estimación de la posición estática del dispositivo móvil debido a la escasa información con la que cuenta el sistema.
- El sistema de posicionamiento local en interiores no funciona con normalidad cuando el dispositivo u objetivo se encuentra en movimiento; ya que con la actual configuración del filtro de Kalman no fue posible predecir una posición futura con los datos de las mediciones anteriores del parámetro RSSI. Por lo tanto se concluye que el LPS en interiores funciona únicamente cuando se pretende estimar la posición estática de un dispositivo móvil dentro del área de interés.
- Se concluyó que el sistema de posicionamiento local en interiores que incluye la técnica *Fingerprints*, el procesamiento mediante el filtro de Kalman y el algoritmo validación de resultados, no tiene un buen desempeño ya que solo el 22.22% de los puntos de prueba desconocidos alcanzan una probabilidad de acierto mayor o igual al 50%, el 62.96% de los puntos logran una probabilidad de acierto menor al 50% y el 14.81% de los puntos tiene probabilidad de acierto nula considerando un error de estimación de 0.8m.

## 5.2. Recomendaciones

- Tras analizar el comportamiento del parámetro RSSI, se recomienda seguir la metodología general de pruebas durante toda la ejecución del sistema de posicionamiento local en interiores para evitar el incremento de las variaciones del parámetro RSSI que podrían conducir a errores en la estimación.
- Incluir otro tipo de sensor (acelerómetro, giroscopio o magnetómetro) en el sistema de posicionamiento local en interiores para obtener mayor información del movimiento del dispositivo, tanto para situaciones estáticas como dinámicas.

### 5.3. Trabajos Futuros

- El sistema de posicionamiento local en interiores implementa el filtro de Kalman considerando una relación lineal entre las mediciones del parámetro RSSI en un mismo punto de prueba, con lo que no se logró mejorar las estimaciones de la posición, por lo que entre los trabajos futuros se encuentra analizar si las extensiones del filtro de Kalman (EKF o FKU) permiten incrementar el desempeño del sistema considerando la relación no lineal entre el parámetro RSSI y la distancia.
- El sistema de posicionamiento local en interiores desarrollado en este trabajo de investigación logro resultados cercanos a los propuestos en cuanto a la probabilidad de acierto y al tiempo de detección, sin embargo son aun distantes de los ideales, por lo que en un trabajo futuro se podría usar estas evidencias para buscar otros métodos, técnicas u otras características aprovechando la señal inalámbrica para incluirlos en el sistema desarrollado o crear otro nuevo con el fin de incrementar el desempeño del sistema.
- El proyecto de investigación se centró en la estimación de la posición estática de un dispositivo móvil y cuando se aplicó el sistema a un objetivo en movimiento se presentaron nuevos retos e inconvenientes, por esta razón en un trabajo futuro se podría analizar más a fondo este tema con el fin de implementar un sistema de posicionamiento local en interiores orientado a situaciones estáticas y dinámicas.

## Referencias

- Agudo, A. (2009). *Sistema de localización de dispositivos móviles basada en Wireless LAN* (tesis de pregrado). Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España.
- Alegsa, L. (2016). *Definición de Hayes (conjunto de comandos AT para módems)*. Obtenido de <http://www.alegsa.com.ar/Dic/hayes.php>
- Arduino. (2017). *Arduino DUE*. Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDue>
- Avallone, C., & Capdehourat, G. (2010). *Posicionamiento indoor con señales de WiFi*.
- Banerji, S., & Singha, R. (2013). On IEEE 802.11: Wireless LAN Technology. *International Journal of Mobile Network Communications & Telematics (IJMNCT)*, 3(4). doi:10.5121/ijmnc.2013.3405
- Barba, F. (2012). *Estudio de algoritmos de localización en interiores, para tecnologías móviles de última generación* (tesis de maestría). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Bardwell, J. (2002). *Converting Signal Strength Percentage to dBm Values*. WildPackets.
- Bianco, J. (2013). *Estudio y aplicación de Filtros de Kalman sobre sistemas de posicionamiento global para el suavizado de trayectorias geoposicionadas* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Carcavilla, A. (2006). *Sistemas de posicionamiento basados en WiFi* (tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Chapre, Y., Mohapatra, P., Jha, S., & Seneviratne, A. (s.f.). *Received Signal Strength Indicator and Its Analysis in a Typical WLAN System*. Sydney, Australia.
- Chico, A. (2009). *Diseño y desarrollo de un sistema de posicionamiento en interiores basado en WiFi con tecnología Android* (tesis de pregrado). Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España.
- Cisco. (2015). *Cisco Aironet 1140 Series Access Point Data Sheet*. Obtenido de [http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-1130-ag-series/datasheet\\_c78-502793.html](http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-1130-ag-series/datasheet_c78-502793.html)
- Cisco. (2017). *802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi Technical White Paper*. Obtenido de

[http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/white\\_paper\\_c11-713103.html](http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/white_paper_c11-713103.html)

- Dal Lago, A., Grondona, E., & Incicco, S. (2010). *Posicionamiento espacial mediante uso de redes WiFi*. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- DELL Inc. (2014). *Nueva laptop Inspiron 14 serie 5000*. Obtenido de <http://www.dell.com/ec/p/inspiron-14-5447-laptop/pd>
- Dignani, J. P. (2011). *Análisis del protocolo Zigbee*. Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina.
- Dobarco, C. (2013). *Sistema de posicionamiento para superficies comerciales mediante dispositivos móviles* (tesis de pregrado). Universidad Pontificia ICAI, Madrid, España.
- Electronut Labs. (2014). *A Simple IOT Project with the ESP8266 WiFi Module*. Obtenido de <http://electronut.in/an-iot-project-with-esp8266/>
- Espressif Systems. (2013). *Espressif Smart Connectivity Platform: ESP8266*.
- Figuera, C. (2009). *Algoritmos de aprendizaje estadístico aplicados a la radiolocalización en interiores* (tesis de doctorado). Universidad Rey Juan Carlos, Fuenlabrada, España.
- Francica, J. (2014). Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN) Market expected to grow \$2.60 Billion By 2018. *Directions Magazine*. Obtenido de <http://www.directionsmag.com>
- Github. (s.f.). *ESP8266 Serial Esp-01 WIFI Wireless*. Obtenido de <https://github.com/esp8266/esp8266-wiki/wiki>
- InLocation Alliance*. (2017). Obtenido de <http://www.in-location-alliance.com>
- Instructables. (2016). *How to Use the ESP8266-01 Pins*. Obtenido de <http://www.instructables.com/id/How-to-use-the-ESP8266-01-pins/>
- Mahamud, M. A., & Chowdhury, M. (2015). Indoor Location System with Wi-Fi and Alternative Cellular Network Signal. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 10(3), 59-70.
- Marín, L. (2011). *Navegación de un Robot móvil de Configuración Diferencial basada en Fusión Sensorial* (tesis de maestría). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

- Martínez, O. (2013). *Localización Indoor Multimodal* (tesis de maestría). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. Obtenido de <https://riunet.upv.es>
- Mendenhall, W., Beaver, R. J., & Beaver, B. M. (2010). *Introducción a la probabilidad y estadística*. México, D.F, México: Cengage Learning.
- Meraki. (2011). *802.11n Technology*. San Francisco, Estados Unidos. Obtenido de [http://www.rhowireless.com/hardware/mesh/docs/meraki\\_white\\_paper\\_802\\_11n.pdf](http://www.rhowireless.com/hardware/mesh/docs/meraki_white_paper_802_11n.pdf)
- Navarro, M. Á. (2010). *Análisis de medidas de potencia en interiores para su aplicación en sistemas de localización basados en la técnica de Fingerprinting* (tesis de doctorado). Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, España.
- Oguchi, K., Maruta, S., & Hanawa, D. (2014). Human positioning estimation method using received signal strength indicator (RSSI) in a wireless sensor network. *ScienceDirect*, 126 – 132. doi:10.1016/j.procs.2014.07.066
- Papamantou, C., Preparata, F., & Tamassia, R. (2008). Algorithms for Location Estimation Based on RSSI Sampling. *ALGOSENSORS*, (págs. 72-86).
- Pascual, A. (2006). *EKF y UKF: dos extensiones del filtro de Kalman para sistemas no lineales aplicadas al control de un péndulo invertido*. Universidad de la República Uruguay, Montevideo, Uruguay.
- Pérez, M. S., Carrera, V., & Altamirano, D. (s.f.). *Posicionamiento de Eventos mediante Técnicas de Procesamiento de Señales Acústicas*. Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Quito, Ecuador.
- Pfister, S. T. (2006). *Algorithms for Mobile Robot Localization and Mapping, Incorporating Detailed Noise Modeling and Multi-Scale Feature Extraction* (tesis de doctorado). California Institute of Technology, California, Estados Unidos. doi:10.1.1.364.644
- Prometec. (2016). *ESP8266 Plugin para Arduino IDE*. Obtenido de <http://www.prometec.net/esp8266-plugin-arduino-ide/>
- Pu, C.-C., Pu, C.-H., & Lee, H.-J. (2011). *Indoor Location Tracking using Received Signal Strength Indicator*. Shanghai, China: InTech. Obtenido de <http://www.intechopen.com/books/emerging-communications-for-wireless-sensornetworks/>

- Roces, C. (2016). *Posicionamiento Dinámico, Filtro de Kalman y su aplicación al Buque Oceanográfico Angeles Alvariño* (tesis de pregrado). Universidad de la Laguna, Tenerife, España.
- Romero, J. (2009). *Desarrollo de un sistema de comunicaciones para robots AIBO* (tesis de pregrado). Universidad de Castilla - La Mancha, Ciudad Real, España.
- room-15. (2015). *ESP8266 - AT Command Reference*. Obtenido de <https://room-15.github.io/blog/2015/03/26/esp8266-at-command-reference/>
- Takens, S. (2010). *Indoor location tracking using Signal Strength Pinpoints* (tesis de maestría). Universidad de Groninga, Groninga, Países Bajos.
- Ward, L. (2012). *802.11ac Technology Introduction. White Paper*.
- Welch, G., & Bishop, G. (2006). *An Introduction to the Kalman Filter*. Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, Carolina del Norte, Estados Unidos.