

**PROPUESTA DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA INTERIORES
EMPLEANDO WI-FI**



John Sebastian Daza Murgueitio

Director: Víctor Fabián Miramá Pérez

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e Inalámbricas - GRIAL
Popayán, noviembre de 2021

**PROPUESTA DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA INTERIORES
EMPLEANDO WI-FI**



Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones

John Sebastian Daza Murgueitio

Director: Víctor Fabián Miramá Pérez

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e Inalámbricas - GRIAL
Popayán, noviembre de 2021**



TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	1
CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO	3
1.1 Sistemas de posicionamiento	3
1.2 Wi-Fi.....	10
1.2.1 Escaneo de redes Wi-Fi.....	11
CAPÍTULO 2 TÉCNICAS Y MÉTRICAS DE POSICIONAMIENTO	15
2.1 Técnicas de posicionamiento.....	15
2.2 Métricas de posicionamiento.....	25
CAPÍTULO 3 DISEÑO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO	33
3.1 Requerimientos	33
3.2 Diseño e Implementación	34
3.3 Implementación.....	39
3.4 Bosquejo sistema de posicionamiento en interiores empleando Wi-Fi.....	43
3.5 Pruebas	44
4. CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS. .	65
4.1 Conclusiones.....	65
4.2 Recomendaciones.....	66
4.3 Trabajos futuros.....	66



Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1-1. Sistema de Posicionamiento Global.	4
Figura 1-2. Sistema de Posicionamiento en Interiores.	5
Figura 1-3. Formato de una trama Wi-Fi.	12
Figura 1-4. Escaneo de redes pasivo.	13
Figura 1-5. Formato de una trama Probe Request.	13
Figura 1-5. Escaneo de redes activo.	14
Figura 1-6. Formato de una trama Probe Response.	14
Figura 2-1. Proximidad.	16
Figura 2-2. Análisis de visión usando YOLO.	17
Figura 2-3. Triangulación.	18
Figura 2-4. Angulación para 2D.	19
Figura 2-5. Fingerprinting visual.	20
Figura 2-6. Fingerprinting Wi-Fi.	21
Figura 2-7. Diseño funcional de los sistemas de localización basados en fingerprinting.	24
Figura 2-8. Posicionamiento usando ToA.	26
Figura 2-9. Posicionamiento usando TDoA.	27
Figura 2-10. Posicionamiento usando AoA.	28
Figura 2-11. Posicionamiento usando RSSI.	29
Figura 2-12. Mismo valor de RSSI distintas posiciones.	30
Figura 2-13. Ejemplo de red neuronal.	32
Figura 3-1. Estructura metodologica RUP.	35
Figura 3-2. Diagrama de bloques general de los sistemas de posicionamiento.	34
Figura 3-3. Diagrama de bloques general de un sistema de posicionamiento empleando dispositivos Wi-Fi.	35
Figura 3-4. Diagrama de flujo general de un sistema de posicionamiento empleando dispositivos Wi-Fi	35
Figura 3-5. Diagrama de flujo para implementación del sistema.	39
Figura 3-6. Dimensiones del entorno de estudio.	40
Figura 3-7. División del entorno en cuadrículas.	40
Figura 3-8. Huellas 0.5 y 1 m ² .	41
Figura 3-9. Canales Wi-Fi en la banda de 2.4 Ghz.	42
Figura 3-10. Interfaz de red inalámbrica apagada.	43
Figura 3-11. Interfaz de red inalámbrica desconectada.	43
Figura 3-12. Interfaz de red inalámbrica encendida.	43
Figura 3-13. Estado encendido de la interfaz de red inalámbrica.	44



Figura 3-14. Bosquejo general del sistema de posicionamiento empleando Wi-Fi	44
Figura 3-15. División del entorno.	45
Figura 3-16. Desconectado de la red Wi-Fi.	45
Figura 3-17. Dispositivo móvil en punto (2,0) en el área "Sala".	46
Figura 3-18. Resultado para punto (2,0) prueba 1 en área "Sala".	46
Figura 3-19. Dispositivo móvil en punto (3,2) en el área "Sala".	47
Figura 3-20. Resultado para punto (3,2) prueba 2 en área "Sala".	47
Figura 3-21. Dispositivo móvil en punto (0,4) en el área "Garaje".	48
Figura 3-22. Resultado para punto (0,4) prueba 3 en área "Garaje".	48
Figura 3-23. Resultado erróneo para punto (0,4) prueba 4 en área "Garaje".	48
Figura 3-24. Dispositivo móvil en punto (5,4) en el área "Comedor".	49
Figura 3-25. Resultado punto (5,4) prueba 4 en área "Comedor".	49
Figura 3-26. Dispositivo móvil en punto (4,3) en el área "Comedor".	50
Figura 3-27. Funcionamiento erróneo área "Comedor" prueba 6.	50
Figura 3-28. Dispositivo móvil en punto (6,2) en el área "Cuarto".	51
Figura 3-29. Funcionamiento correcto área "Cuarto" prueba 7.	51
Figura 3-30. Dispositivo móvil en el área "Pasillo".	52
Figura 3-31. Correcto funcionamiento en área "Pasillo".	52
Figura 3-32. Dispositivo móvil en punto (2,0) en el área "Sala".	53
Figura 3-33. Posicionamiento en punto (2,0).	54
Figura 3-34. Dispositivo móvil en punto (3,2) en el área "Sala".	54
Figura 3-35. Posicionamiento en punto (3,2).	55
Figura 3-36. Dispositivo móvil en punto (0,3) en el área "Garaje".	55
Figura 3-37. Posicionamiento en punto (0,3).	56
Figura 3-38. Dispositivo móvil en punto (2,4) en el área "Garaje".	57
Figura 3-39. Posicionamiento en punto (2,4).	57
Figura 3-40. Dispositivo móvil en punto (6,4) en el área "Comedor".	58
Figura 3-41. Posicionamiento en punto (6,4).	58
Figura 3-42. Dispositivo móvil en punto (5,3) en el área "Comedor".	59
Figura 3-43. Posicionamiento en punto (5,3).	59
Figura 3-44. Dispositivo móvil en punto (6,2) en el área "Cuarto".	60
Figura 3-45. Posicionamiento en punto (6,2).	60
Figura 3-46. Nueva ubicación dispositivo emisor de señal Wi-Fi.	61
Figura 3-47. Dispositivo móvil en punto (9,3).	61
Figura 3-48. Posicionamiento en punto (9,3) con variación en el entorno.	62
Figura 3-49. Dispositivo móvil en punto (3,1) en el área "Sala" con variación en el entorno.	62
Figura 3-50. Posicionamiento en punto (3,1) con variación en el entorno.	63



Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Tabla comparativa de técnicas de posicionamiento.	38
Tabla 2. Tabla comparativa de métricas de posicionamiento.	39
Tabla 3. Desviación estandar en área "Sala".	60
Tabla 4. Desviación estándar en área "Garaje".	61
Tabla 5. Desviación estándar en área "Comedor".	61
Tabla 6. Desviación estándar en área "Cocina" y "Pasillo".	39
Tabla 7. Desviación estándar en área "Cuarto".	39
Tabla 8. Desviación estándar del sistema.	39

Lista de Acrónimos

2D	<i>2 Dimensions</i> , 2 Dimensiones.
3D	<i>3 Dimensions</i> , 3 Dimensiones.
ACM	<i>Automatic Configuration Module</i> , Modulo de Configuración Automático.
AoA	<i>Angle of Arrival</i> , Ángulo de Llegada.
AP	<i>Access Point</i> , Punto de Acceso.
BS	<i>Base Station</i> , Estación Base.
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> , Espectro Ensanchado de Secuencia Directa.
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> , Sistema Global de Navegación por Satélite.
GPS	<i>Global Positioning System</i> , Sistema de Posicionamiento Global.
GSM	<i>Global System for Mobile communications</i> , Sistema Global para Comunicaciones Móviles.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i> , Industriales, Científicas y Médicas
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones.
K-NN	<i>k-nearest Neighbors</i> , K-vecinos más Cercanos.
LAN	<i>Local Area Network</i> , Red de Área Local.
LoS	<i>Line of Sight</i> , Línea de Vista.
MAC	<i>Media Access Control</i> , Control de Acceso al Medio.
MS	<i>Mobile Station</i> , Estación Móvil.
MSM	<i>Module Specific Means</i> , Modulo de Medios Específicos.
NDIS	<i>Network Driver Interface Specification</i> , Especificación de la interfaz del Controlador de Red.
NIC	<i>Network Interface Card</i> , Tarjeta de Interfaz de Red.
NLoS	<i>None line of sight</i> , Sin Línea de Visión.
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales



OID	<i>Identifier Object</i> , Objeto Identificador.
PAN	<i>Personal Area Network</i> , Red de Area Personal.
PoA	<i>Phase of Arrival</i> , Fase de Llegada.
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i> , Identificación por Radiofrecuencia.
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i> , <i>Indicador de la Intensidad de Señal Recibida</i> .
RTof	<i>Return Time of Flight</i> , Tiempo de Vuelo de Retorno.
RUP	<i>Rational Unified Process</i> , Proceso Unificado Racional.
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido.
SSID	<i>Service Set Identifier</i> , Identificador de Conjunto de Servicios.
TDoA	<i>Time Difference of Arrival</i> , Diferencia en el Tiempo de Vuelo.
ToA	<i>Time of Arrival</i> , Tiempo de Vuelo.
UWB	<i>Ultra-Wide Band</i> , Banda Ultra Ancha



INTRODUCCION

Los sistemas de comunicación inalámbrica se habían concentrado hasta hace algunos años, en hacer posible su acceso de manera universal. Una vez logrado esto, los esfuerzos de desarrollo se centran en proporcionar nuevos servicios, demandados por los usuarios o a plantear innovadoras aplicaciones para las necesidades que paulatinamente van apareciendo.

En los últimos años se ha experimentado un enorme desarrollo por los sistemas de localización en interiores, debido a las necesidades de una sociedad que cada día es más tecnológica. Para crear estos sistemas se han explorado diferentes tecnologías basadas en radiofrecuencia (Wi-Fi, Bluetooth, entre otros), dentro de estas se encuentra una tecnología basada en radiofrecuencia llamada Wi-Fi, la cual se presta para ser empleada en este tipo de sistemas debido a su capacidad de comunicación inalámbrica, el bajo costo de sus dispositivos y la sencillez de su operación.

En este trabajo de grado se plantea la evaluación de un sistema de posicionamiento para interiores empleando la tecnología Wi-Fi, haciendo uso conjunto de las técnicas de localización como lo es proximidad, el reconocimiento de patrones de radiación, una métrica como el Indicador de la intensidad de señal recibida (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*), y el estudio de un entorno seleccionado.

Con el ánimo de responder a la pregunta de investigación ¿Cómo debe ser un sistema de posicionamiento para interiores empleando la tecnología Wi-Fi y cuál es su precisión? El cual pueda servir como punto de partida para la localización en diferentes tipos de entornos interiores, de igual manera como referencia para posteriores investigaciones con este tipo de sistemas de posicionamiento interior.





CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO

En este capítulo se presentan los conceptos más importantes para el desarrollo del trabajo de grado, de igual manera, se introducen los conceptos de las técnicas y métricas utilizadas en los sistemas de posicionamiento en interiores.

1.1 Sistemas de posicionamiento

Un sistema de posicionamiento es un conjunto de dispositivos móviles y/o fijos que permiten dar información acerca de la ubicación de una persona, lugar o dispositivo en cualquier momento. Los sistemas de posicionamiento se pueden clasificar en dos clases, según el escenario donde sean implementados, los sistemas de posicionamiento en exteriores y los sistemas de posicionamiento en interiores [1].

Los sistemas de posicionamiento en exteriores son aquellos que realizan la estimación de la posición de diferentes usuarios empleando en su mayoría constelaciones de satélites, este tipo de sistemas tienen diversas aplicaciones en entornos abiertos, es decir, ciudades, fuera de edificios o construcciones. La mayoría de estos sistemas se basan en el sistema global de navegación por satélite (GNSS, *Global Navigation Satellite System*), un claro ejemplo es el sistema de posicionamiento global (GPS, *Global Positioning System*) cuya función principal es permitir que los usuarios conozcan su posición o la de otro elemento en cualquier lugar del planeta utilizando un receptor, mediante el uso de satélites y técnicas de estimación de la posición. En estos sistemas los satélites que se encuentran en órbita envían señales a los receptores ubicados en diferentes partes de la tierra, la figura 1-1 muestra un ejemplo de distribución satelital utilizados por receptores de los sistemas de posicionamiento global, los cuales usan la señal percibida para realizar los cálculos y así brindar una estimación de la posición del objeto o de lugares de interés [2].

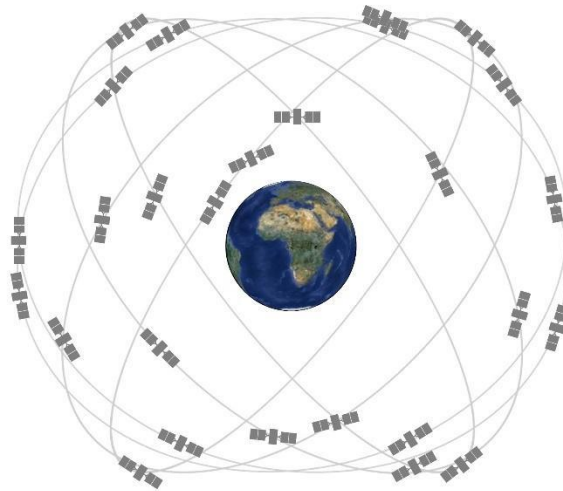


Figura 1-1 Sistema de Posicionamiento Global, tomado de [11]

Con el surgir de los sistemas GPS y la gran exactitud que tienen, han nacido o mejorado servicios como la navegación aérea, marítima o terrestre, así como las tareas de rescate entre otros servicios. La masificación en los servicios se debe a que la implementación de receptores GPS en los dispositivos móviles ha aumentado, con lo cual el uso de estos sistemas se ha vuelto popular y cotidiano [4]. Sin embargo, los sistemas satelitales no son útiles en entornos cerrados debido a que no es posible satisfacer la necesidad de la existencia de línea de vista (*LoS*, *Line of Sight*) entre satélites y receptores. Además, la precisión de este tipo de sistemas depende del número de satélites con los que el receptor esté conectado; otro aspecto a tener en cuenta es la banda de frecuencias en las que trabajan los sistemas de posicionamiento en exteriores, 1575 MHz, dicha banda tiene dificultades para que las señales atraviesen objetos (paredes, muebles, personas, árboles frondosos, entre otros) lo que ocasiona la pérdida de la línea de vista entre el objetivo y los satélites [4].

Los sistemas de posicionamiento en interiores, en la última década, están siendo objeto de un amplio estudio, por lo tanto, aún no se tiene definida una tecnología ni una técnica estándar para el cálculo del posicionamiento, dado que estas dependen de la aplicación del sistema de posicionamiento [15]. Al igual que los sistemas de posicionamiento en exteriores, estos sistemas pueden ser utilizados para diversas necesidades, bien sea en el monitoreo de habitaciones, estudios de pautas de conducta, monitorización y en la información en tiempo real con base a la ubicación. Un sistema de posicionamiento en interiores se puede definir como un sistema que permite determinar la posición de una persona u objeto, de manera continua y en tiempo real en un espacio físico, como se evidencia en la figura 1-2[3], a menos que el sistema se encuentre apagado, estos sistemas pueden proporcionar diferentes tipos de información respecto a la ubicación, los cuales se dividen en: información absoluta que se puede medir y mostrar, información relativa que mide el movimiento de diferentes partes de un objetivo e información de proximidad, la cual especifica el lugar donde se encuentra un objetivo, cada una de estas puede ser utilizada para las diferentes aplicaciones [3].

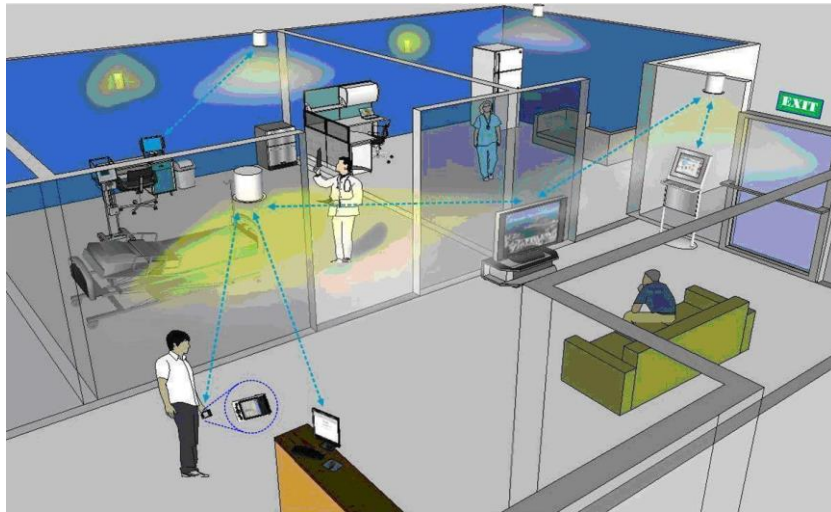


Figura 1-2 Sistema de posicionamiento en interiores, tomado de [3]

Existen 4 formas de funcionamiento para los sistemas de posicionamiento [4]:

- Posicionamiento remoto: donde el transmisor de la señal es móvil y los receptores o unidades de medición son fijas, la información captada la usa una estación con mayor capacidad de procesamiento, la cual brinda la ubicación del transmisor.
- Auto posicionamiento: en esta tipología se reciben las señales de varios transmisores en ubicaciones predeterminadas, en una unidad de medición o receptor el cual es móvil, este cuenta con la capacidad de calcular su ubicación con la información recopilada.
- Posicionamiento remoto indirecto: el cual se logra con la existencia de un enlace inalámbrico de datos, donde se envía el resultado de las unidades de medición desde el posicionamiento automático hacia el posicionamiento remoto.
- Posicionamiento automático indirecto: la información del resultado es enviada desde el posicionamiento remoto hacia una unidad móvil mediante un enlace inalámbrico [4].

1.1.1. Aplicaciones de los sistemas de posicionamiento en interiores.

Debido al auge que se produjo desde la aparición de los sistemas de posicionamiento en interiores, se han explorado varias alternativas para darle uso a la información proporcionada por estos, las cuales se pueden clasificar de la siguiente manera:



- **Navegación en interiores:** la función en este tipo de aplicaciones es permitir al usuario saber su posición en lugares muy concurridos como hospitales, museos, centros comerciales, además, se puede recibir información en tiempo real de sitios o equipos de interés cercanos al usuario.
- **Estudios de pautas de conducta:** al conocer los movimientos de los usuarios dentro de diferentes establecimientos se pueden realizar aplicaciones con la capacidad de predecir el comportamiento comercial del usuario.
- **Monitoreo:** al conocer la ubicación de un usuario en tiempo real, se pueden realizar aplicaciones para dar seguimiento a determinadas variables relacionadas con el usuario, por ejemplo, un paciente en un hospital, un niño en un campamento, entre otros.
- **Información en tiempo real con base en la ubicación:** en este tipo de aplicaciones el usuario puede recibir información de acuerdo con su ubicación actual bien sea de promociones en un centro comercial o información cultural sobre el lugar donde se encuentra, entre otros [12].

1.1.2. Parámetros de evaluación de los sistemas de posicionamiento en interiores.

Los sistemas de posicionamiento son evaluados mediante diferentes parámetros, dependiendo del contexto para el cual han sido diseñados, entre los cuales se encuentran la exactitud, disponibilidad, precisión, área de cobertura, complejidad, robustez, escalabilidad y costo [1], [3], [4], [8], [18].

- **Exactitud:** Se hace referencia a la proximidad que existe entre el valor medido en tiempo real por el sistema y un valor de referencia establecido anteriormente, del cual ya se conoce su posición exacta, almacenado en una base de datos. Se puede definir también como la distancia euclidiana entre un valor estimado y un valor real [8].
- **Disponibilidad:** Se define como el porcentaje de tiempo en el cual el sistema brinda el servicio con una precisión y calidad requerida. Un sistema se considera de baja disponibilidad si está en el 95%, en el rango medio o regular se encuentra con una disponibilidad mayor al 99% y tiene una alta disponibilidad si está por encima del 99.9% [1].
- **Precisión:** En este parámetro se toma en consideración el valor de los errores de distancia media, así mismo, otros autores la toman como el valor de la desviación estándar en el error de ubicación [4].
- **Área de cobertura:** Es el espacio físico que está cubierto por el sistema de posicionamiento. Existen tres tipos de cobertura: local si el sistema tiene un área pequeña bien definida y limitada, la cual no es posible de extender, cobertura escalable donde se puede aumentar la capacidad de usuarios y



extender el área de impacto si se hace un aumento en el hardware del sistema y por último se tiene la cobertura global, donde la zona de trabajo del sistema es mundial o mucho más extensa. [18], [1].

- **Complejidad:** Hace referencia al grado de intervención humana que debe haber durante el proceso de despliegue y mantenimiento del sistema, además del tiempo de computación requerido para estimar la posición [1].
- **Robustez:** En este se evalúa la solidez de la técnica que utiliza el sistema para estimar la posición, un sistema es robusto si funciona incluso con la ausencia de algunas señales o con valores erróneos [4], [18].
- **Escalabilidad:** Se hace referencia a la capacidad del sistema de funcionar de manera adecuada a pesar del aumento bien sea del número de usuarios o de los recursos disponibles [3].
- **Costo:** Este parámetro comprende diferentes aspectos por los cuales se puede evaluar un sistema, bien sea: tiempo, dinero, espacio o energía. El tiempo hace referencia al intervalo de tiempo necesario para la instalación y mantenimiento del sistema. En cuanto al dinero se refiere al valor de componentes de infraestructura, dispositivos, instalación y mantenimiento. En la energía se evalúa la cantidad de energía requerida por el sistema para su funcionamiento [3].

1.1.3. Tipos de tecnologías para posicionamiento en interiores

Debido a la gran aceptación que han tenido los sistemas de posicionamiento en interiores, se ha aumentado el interés por la investigación de tecnologías con las cuales se pueden trabajar en estos sistemas y así superar factores como el multitrayecto, la cobertura y el uso del espectro, para obtener resultados adecuados, permitiendo así a los usuarios tener información exacta de la posición de un objetivo en particular o de sí mismo. La elección de dicha tecnología depende de la aplicación, cada una tiene ventajas y desventajas. La tecnología hace referencia al medio de comunicación o al tipo de señal que será utilizado para el sistema de posicionamiento en interiores, como puede ser: luz, ondas de radio, ondas sonoras, entre otros.

Las tecnologías utilizadas para el posicionamiento en interiores se les podría hacer una clasificación adicional ya que algunas requieren infraestructura dedicada y otras utilizan infraestructura existente dentro de una edificación.

En cuanto a las tecnologías que requieren de una infraestructura dedicada están:

- **Identificación por radiofrecuencia (RFID, *Radio Frequency identification*):** Trabaja en las bandas de 868 MHz y 2.4 GHz, en esta tecnología se transmite la identidad de un objeto o dispositivo mediante ondas radio, utilizando un lector de etiquetas, mediante el uso de radio frecuencia y protocolos



predefinidos. Tiene la capacidad de penetrar objetos sólidos y no requiere la existencia de LoS entre transmisor y receptor, sin embargo, su zona de cobertura para el posicionamiento es reducida al igual que su almacenamiento y no posee la capacidad de integración con otros sistemas [19].

- **Banda ultra ancha (UWB, *Ultra-Wide Band*):** En esta tecnología se hace uso de señales de radiofrecuencia, las cuales ocupan el 20% de la frecuencia portadora central, donde la información es distribuida a una porción del espectro. Estos sistemas tienen poco consumo de energía en transmisión, pero una gran capacidad de transmisión de datos. Cuenta con una alta precisión aun con la existencia de múltiples rutas, debido a la capacidad de atravesar paredes y cualquier tipo de obstáculos, si se realiza un diseño adecuado no existe interferencia con otros sistemas de radio frecuencia. Sin embargo, el costo de los dispositivos UWB, la interferencia con materiales líquidos y el corto alcance se convierten en grandes inconvenientes [4], [18].
- **Infrarrojo:** Esta tecnología utiliza el espectro invisible (rayos infrarrojos 430 THz – 300 GHz y rayos ultravioleta 30 PHz – 790 THz), tiene dos modos de uso directo y difuso, en el modo difuso se hace uso de un led angular por lo cual no se requiere de la presencia de un canal LoS obteniendo así mayor alcance que en el modo directo. En el modo directo es posible que se presenten interferencias o errores en los sistemas si no se cuenta con un canal LoS. Es una tecnología muy adecuada para comunicaciones que proveen una alta confidencialidad puesto que no es accesible desde fuera del entorno donde se encuentra debido a que esta tecnología no atraviesa paredes y requiere de LoS. [6].
- **ZigBee:** Es una tecnología de corta distancia y baja velocidad la cual puede trabajarse como una Red de Área Personal (PAN, *Personal Area Network*). Los nodos utilizados son económicos y de baja complejidad, es una tecnología sensible a interferencias debido a que los sensores que se emplean tienen dificultades para operar en banda de radio industriales, científicas y médicas (ISM, *Industrial, Scientific and Medical*) [18].
- **Ultrasonido:** Es una tecnología que emplea ondas mecánicas u oscilación de la presión transmitidas por un medio, no tiene interferencia con ondas electromagnéticas y un alcance relativamente corto. Los medios de propagación utilizados por los sistemas de posicionamiento en esta tecnología son el aire y los materiales de construcción. En los sistemas de posicionamiento donde se implementa no se requiere la presencia de LoS. Sin embargo, esta tecnología no tiene la capacidad de penetrar paredes sólidas además de verse afectada por interferencia con sonidos de alta frecuencia y pérdida de la señal por obstrucción. [4].

Las tecnologías utilizan la infraestructura ya existente se encuentran:

- **Bluetooth:** Esta tecnología se caracteriza por operar en la banda ISM de 2.4 Ghz, la cual está diseñada para ser una tecnología de muy baja potencia, se



le conoce como un estándar inalámbrico para redes de área personal, caracterizada por ser liviana y ubicua. Para su implementación no se requiere de la existencia de LoS, tiene la necesidad de contar con una gran cantidad de celdas receptoras las cuales son de un costo muy elevado, es necesario un computador que se utiliza como Host para admitir las señales radio, además al trabajar en la banda de 2.4 Ghz es propensa a que se produzcan interferencias [2].

- **Tecnologías basadas en imágenes:** También denominados métodos ópticos, estas tecnologías se basan en la visión de la cámara y la visión del computador, el rendimiento depende de la cantidad de información que se puede extraer de las imágenes. Se puede clasificar en dos categorías: movimiento de la cámara y sensores estáticos. Al compararse con otras tecnologías los dispositivos son de menor costo. Pero existe la necesidad de contar con la presencia de LoS, lo que conlleva una cobertura limitada [4].
- **De base celular:** El Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM, *Global System for Mobile Communications*) opera en las bandas licenciadas, lo cual evita la interferencia de otros dispositivos. Puede hacerse uso del hardware en los dispositivos celulares, pero se tiene baja confiabilidad debido a las condiciones variables en la propagación de la señal [18].
- **Wi-Fi:** Considerado actualmente como el estándar de red inalámbrica local dominante, basado en la propagación de ondas de radio frecuencia con lo cual se definen el protocolo y la interconexión en equipos de comunicaciones de datos en una red de área local (LAN, *Local Area Network*), donde la señal puede verse afectada por diversos factores tales como: paredes, objetos, cuerpos humanos, entre otros. Hace uso de redes ya existentes con lo cual se puede lograr cobertura en más de un edificio, no necesita LoS, sin embargo, cambios bruscos en el entorno pueden alterar la propagación de la señal. Es posible reutilizar la infraestructura con lo cual se logra disminuir los costos del desarrollo de los sistemas de posicionamiento en interiores. [4].

1.1.4 Otros tipos de clasificación de las tecnologías de posicionamiento en interiores

El tipo de tecnología a emplear en un sistema de posicionamiento debe elegirse cuidadosamente para mantener un equilibrio entre la complejidad y el desempeño del sistema.

Varios autores clasifican las tecnologías de diferentes maneras, Collin por su parte hace una clasificación basada en la necesidad de hardware donde divide a las tecnologías que requieren de hardware en el edificio y las que son autónomas [20].

Por otro lado, Gu [21] tiene 3 ítems de clasificación, el primer ítem son las tecnologías que se basan en la existencia de redes donde se encuentran las tecnologías basadas en red y no basadas en red.



El segundo ítem son las tecnologías que se basan en la arquitectura del sistema donde se encuentran 3 categorías las cuales son: Arquitectura de posicionamiento automático, arquitectura de posicionamiento de infraestructura y arquitectura asistida por infraestructura orientada hacia sí mismo.

El tercer ítem son las tecnologías que se basan en el medio principal para determinar la posición como lo es el ultrasonido, infrarrojo, Radiofrecuencia (RF, *Radio Frequency*), magnético, basado en visión y tecnologías de sonido audible.

En 2011 Al Ruami y Kamel hacen una clasificación que se basa en el sistema instalado en un edificio que tiene posicionamiento en interior fijo y posicionamiento peatonal interior [22]. En ese mismo año Chliz [23] los clasifica según el conocimiento previo como tecnologías paramétricas y las no paramétricas y por último está Rainer Mautz que da una clasificación basada en el tipo de sensor: infrarrojo, cámara, sonido, WLAN (Wi-Fi), RFID, UWB, GNSS de alta sensibilidad entre otros [24].

1.1.5 Selección de la tecnología

Debido a que en los entornos interiores se presentan diferentes inconvenientes para la recepción idónea de las señales que van a ser usadas por los sistemas de posicionamiento en interiores, en los últimos años se han desarrollado tecnologías basadas en RF las cuales ayudan a mitigar parcial o totalmente dichos inconvenientes como el multitrayecto, el uso del espectro radioeléctrico la velocidad de transmisión de la señal y el ancho de banda, de igual manera se debe tener en cuenta factores como el costo de implementación, área de cobertura, complejidad de implementación entre otras anteriormente mencionadas. Es por esto por lo que a la hora de elegir la tecnología a usar Wi-Fi se torna como la más acertada para implementar en los sistemas de posicionamiento en interiores.

1.2 Wi-Fi

Se le conoce como Wi-Fi o estándar IEEE 802.11, la cual es una tecnología que se basa en la propagación de ondas de radio frecuencia, al utilizar las ondas radio no se hace necesario un medio físico guiado para llevar la información de un punto a otro.

Wi-Fi se posiciona como la tecnología más adecuada y de las más utilizadas para el desarrollo de sistemas de posicionamiento en interiores, esto se debe a que gracias a su gran aceptación es de muy fácil acceso, pues se pueden ver redes Wi-Fi en distintos tipos de edificaciones como museos, aeropuertos, universidades, centros comerciales y la mayoría de los hogares. Además, una gran parte de los dispositivos finales de uso común utilizan esta tecnología y es posible aprovechar la infraestructura existente, disminuyendo los costos del sistema.



El primer estándar que salió al mercado fue el 802.11a en el año de 1999, este se basaba en una tecnología de multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), permitiendo así que los dispositivos que cuenten con esta tecnología tengan una interconexión inalámbrica, entre sí o a través de un punto de acceso (AP, *Access Point*) a la red.

A lo largo de la historia han surgido diferentes estándares, los cuales han presentado cambios, entre los que cabe mencionar la banda de frecuencia de operación, como el estándar IEEE 802.11b lanzado en el año 2007 que trabaja en la banda de 2.4 Ghz con una velocidad de hasta 11 Mbits/s, el estándar IEEE 802.11g trabaja en la misma banda con una velocidad de 54 Mbits/s. Sin embargo, los estándares que operan en esta misma banda pueden llegar a sufrir interferencia con otros sistemas como puede ser Bluetooth. Para solucionar este problema en el año 2003 la Wi-Fi Alliance es quien se encarga de fomentar la compatibilidad entre tecnologías Ethernet inalámbricas bajo la norma 802.11 del IEEE y siguiendo las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunication Union*) abre la banda de 5 Ghz que hasta el momento era de uso exclusivo de sistemas militares y de aplicaciones de la banda ISM. Así mismo en el año 2013 se publica el estándar IEEE 802.11ac, también conocido como Wi-Fi 5 el cual opera en 5 GHz, El inconveniente que presentan los estándares que trabajan en esta banda es la reducción del alcance por el aumento en la frecuencia.

Es importante saber todas las características que se tiene al trabajar con una tecnología como Wi-Fi, sin embargo, para casos de estudio se investiga cómo se realiza el escaneo de las redes presentes en el entorno donde se implementa esta tecnología para así poder realizar la conexión con la red que mejores características brinde al sistema de posicionamiento como lo son intensidad de la señal, la cual es utilizada para realizar la estimación de la posición.

1.2.1 Escaneo de redes Wi-Fi

Una de las características que tiene la tecnología Wi-Fi es proporcionar un mecanismo de escaneo de redes, el cual es efectivo para estaciones que necesitan realizar la conexión con alguna red, descubriendo las redes accesibles, para elegir a cuál debe realizar una conexión. Este escaneo puede ser pasivo o activo. Un escaneo pasivo consiste en identificar qué redes se encuentran disponibles en el entorno mediante la recepción de tramas *beacon*.

En el escaneo pasivo se tiene un grupo de tramas de gestión llamadas tramas *beacon* o baliza, las cuales son tramas de difusión que son transmitidas periódicamente, estas incluyen diferentes campos con información importante, dentro de la cual se destaca el campo identificador de conjuntos de servicio (SSID,



Service Set Identifier), donde se indica la red proveniente de la trama. La estructura de la trama Wi-Fi se muestra en la figura 1-3:

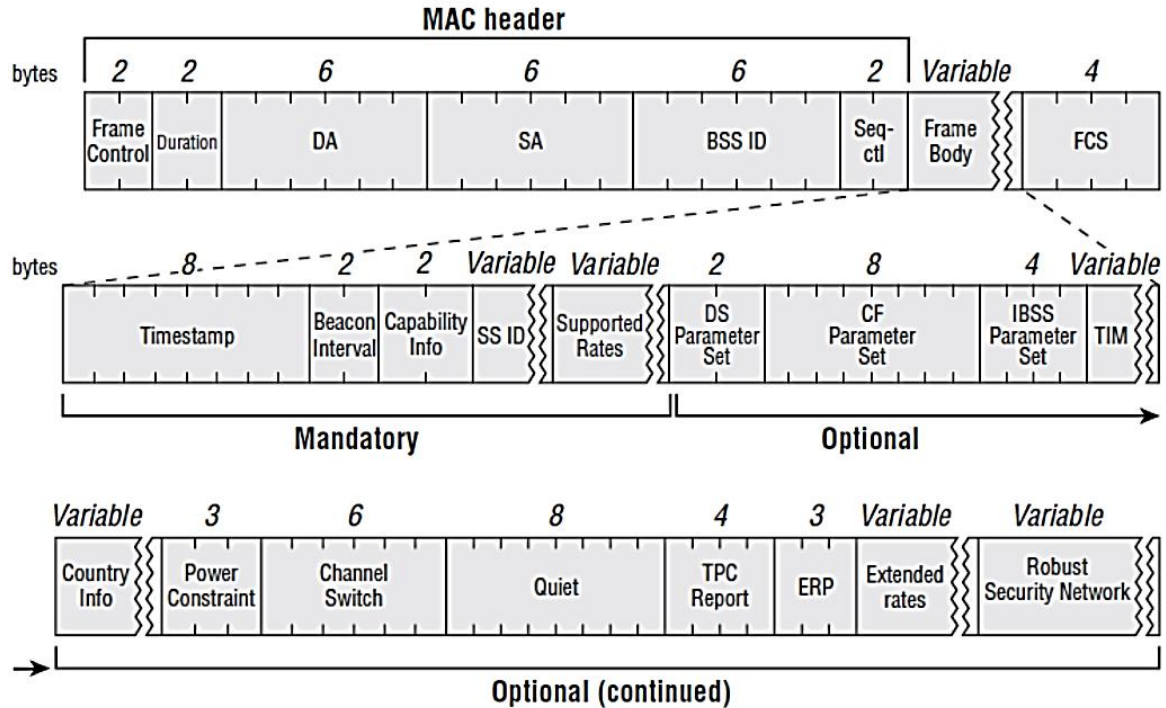


Figura 1-3 Formato de una trama Wi-Fi, tomada de [16]

En Wi-Fi se realiza el constante envío de tramas beacon al entorno cada 100 ms, este es el tiempo establecido por defecto en los dispositivos, sin embargo, existe la posibilidad de ser modificado, la estación móvil que requiera una conexión puede identificar la estación base a la cual se está conectando, empleando el SSID de la trama [13]. En la figura 1-4 se observa un ejemplo de escaneo pasivo de redes Wi-Fi, donde los puntos de acceso envían en su trama *beacon* el SSID, el cual es recibido por el móvil y le permite decidir a qué red conectarse.

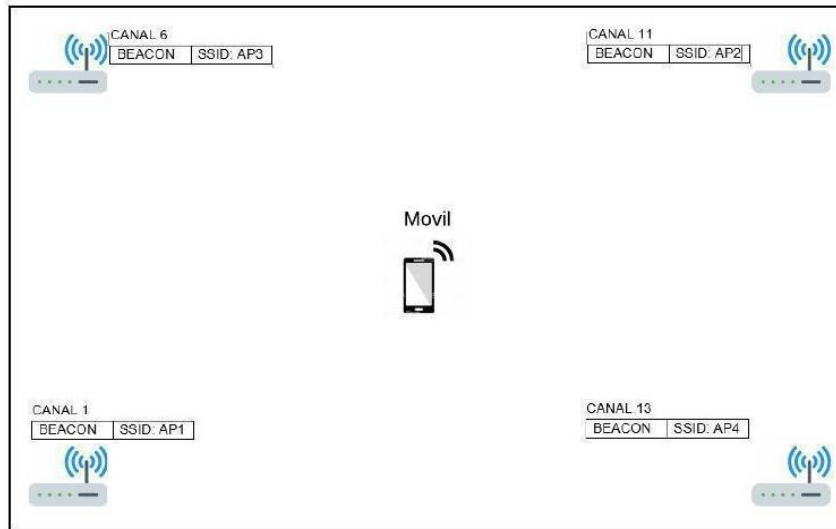


Figura 1-4 Escaneo de redes pasivo, basada en [15]

Por otra parte, se tiene el escaneo activo en el cual los dispositivos móviles se encargan de indagar por la presencia de las redes existentes, este proceso se realiza enviando tramas de tipo *probe request* que tiene una estructura como se muestra en la figura 1-5, las cuales son tramas de gestión del estándar 802.11, estas contienen en su campo SSID el nombre de la red por la cual el dispositivo móvil está intentando establecer la conexión. Para consultar por las redes que en ese momento se encuentran disponibles para su acceso, si se desea implementar el escaneo activo o por difusión, el campo SSID de la trama debe ponerse con un valor “NULL”.

Trama Probe Request

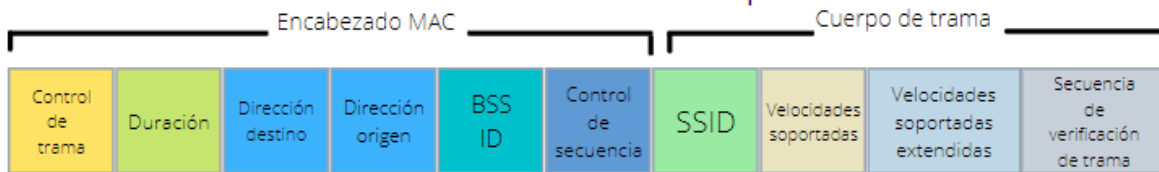


Figura 1-5 Formato de una trama *Probe Request*, basado en [30]

Cuando un AP recibe una trama de gestión *probe request*, debe responder mediante una trama *probe response*, para dar a conocer la presencia de la red mediante el campo SSID.

En la figura 1-6 se muestra un ejemplo del funcionamiento de un escaneo activo de redes Wi-Fi. Donde el dispositivo móvil solicita la información a los 4 puntos de acceso (AP1, AP2, AP3, AP4) mediante el envío de la trama *probe request* cuya estructura se muestra en la figura 1-7.

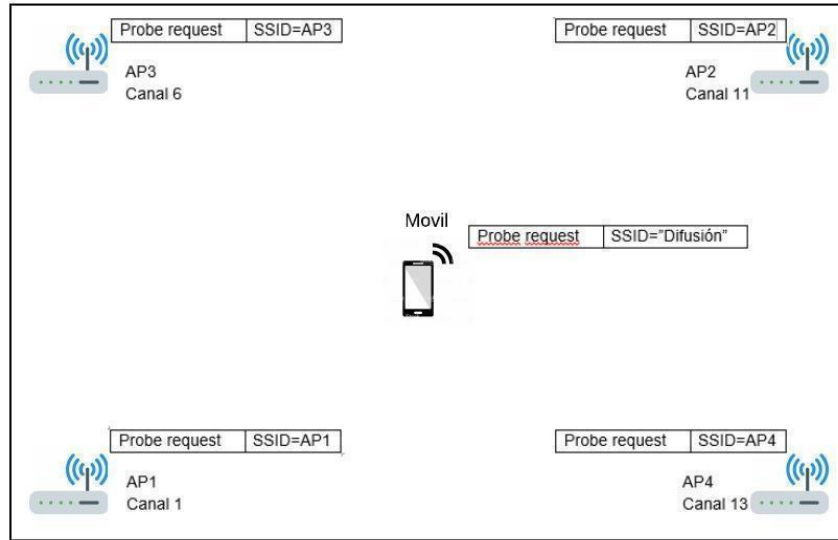


Figura 1-6 Escaneo de redes activo, basado en [15]

Trama Probe Response

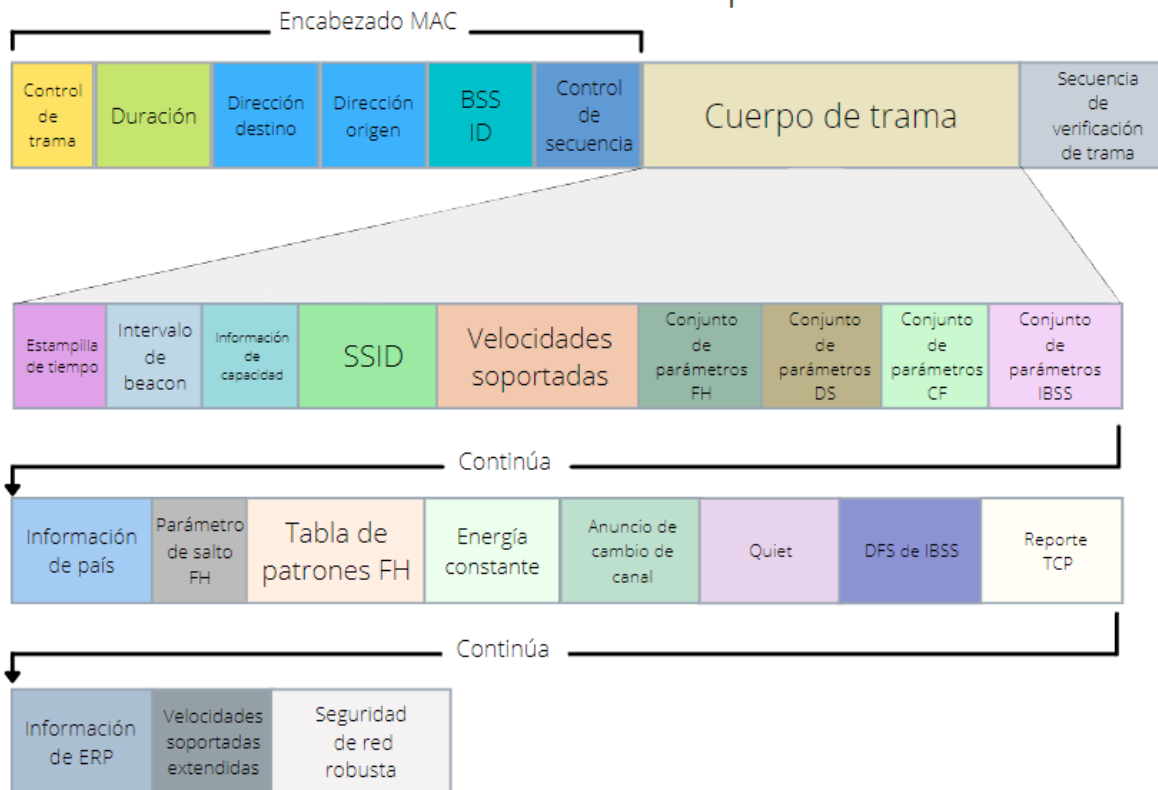


Figura 1-7 Formato de una trama Probe Response, basado en [30]



CAPÍTULO 2 TÉCNICAS Y MÉTRICAS DE POSICIONAMIENTO

Para realizar la construcción de un sistema de posicionamiento en interiores se requiere de la utilización de técnicas y métricas las cuales son las encargadas de contribuir con la estimación de la posición de un objetivo bien sea una persona o un dispositivo móvil, por lo cual con el paso del tiempo se han desarrollado diferentes técnicas y métricas que ayudan a la implementación de estos sistemas de posicionamiento en interiores con diferentes tecnologías.

2.1 Técnicas de posicionamiento

Las técnicas de posicionamiento permiten conocer las coordenadas de un dispositivo, pueden basarse en diferentes características dependiendo de la señal que se intercambia entre un AP y un dispositivo. Existen varias técnicas que pueden ser utilizados en la localización en interiores los cuales tienen ventajas y desventajas dependiendo de la aplicación para la cual se van a usar. Se puede utilizar más de una técnica para compensar las limitaciones de una técnica de posicionamiento única. Las técnicas de posicionamiento se dividen en cuatro grandes grupos como lo son proximidad, análisis de visión, reconocimiento de patrones de radiación (*fingerprinting*) y triangulación.

2.1.1 Proximidad

Esta técnica de posicionamiento detecta las señales (luz, radiofrecuencia, entre otras) enviadas o recibidas en la estación base, la posición que corresponde a esta señal sería entonces la ubicación de la estación base que envió o recibió la señal, la exactitud de este tipo de técnicas depende del alcance de la señal, o en otras palabras del área de cobertura de las celdas.

En la figura 2-1 la estación base o punto de acceso (AP_n) de coordenadas (x_0, y_0) tiene un alcance denominado como "R" de manera omnidireccional, formando así un área de cobertura de radio definido, dentro de la cual se recibe la señal de la estación móvil de coordenadas (x_1, y_1) .



Si al receptor o punto de referencia llegan 2 o más señales la posición se le dará a la estación base de la cual la señal se perciba más fuerte.

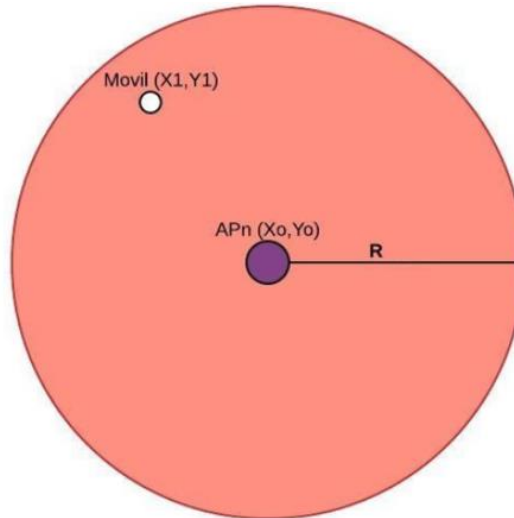


Figura 2-1 Proximidad, basada en [4]

En este tipo de técnicas se conocen tres enfoques:

El más básico de los enfoques es detectar el contacto físico con algún tipo de sensor como pueden ser sensores de presión, detectores de campo capacitivo y sensores táctiles se realiza la estimación de la localización. El segundo enfoque es la detección en los puntos de acceso inalámbricos cuando un dispositivo móvil se encuentra dentro del rango de uno o más puntos. El tercer enfoque que consiste en observar los sistemas automáticos de identificación tales como inicios de sesión en computadores, registros telefónicos, entre otros para generar una aproximación de la localización [5].

2.1.2 Análisis de visión

En esta técnica se brinda la ubicación a partir de un conjunto de imágenes recibidas, de las cuales se hace una identificación de objetivos rastreados y se busca en una base de datos, almacenada previamente en el servidor del sistema, para hacer una comparación e identificar el objetivo deseado. Para ejecutar la localización con análisis de visión no se necesita que los usuarios porten o lleven dispositivos extras. Generalmente se utilizan una o varias cámaras para realizar el seguimiento en el entorno seleccionado y realizar la toma de imágenes en tiempo real y a partir de estas efectuar la identificación del objetivo seleccionado a localizar [6].

En la figura 2-2, se hace una comparación entre imágenes para identificar el objeto rastreado y estimar la posición de acuerdo con el dispositivo que identificó el objetivo.

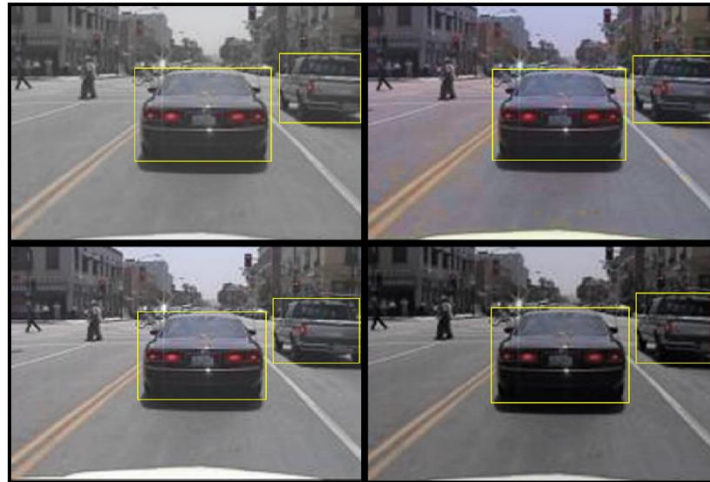


Figura 2-2 Análisis de visión tomada de [10]

2.1.3 Triangulación

Se utilizan las propiedades geométricas de los triángulos para realizar la ubicación del objetivo a localizar. Dependiendo del tipo de señal que se analice se puede derivar en dos clases: lateración y angulación.

La lateración que también se le conoce como técnica de medición de rango, estima la ubicación del objetivo midiendo distancias de varios puntos de referencia, como se observa en la figura 2-3. Si se requiere una estimación de la posición en 2 dimensiones (2D, 2 *Dimensions*) es necesaria la recolección de información de al menos 3 puntos que no sean colineales y para ubicaciones en 3 dimensiones (3D, 3 *Dimensions*) es necesario contar con al menos 4 puntos no coplanares.

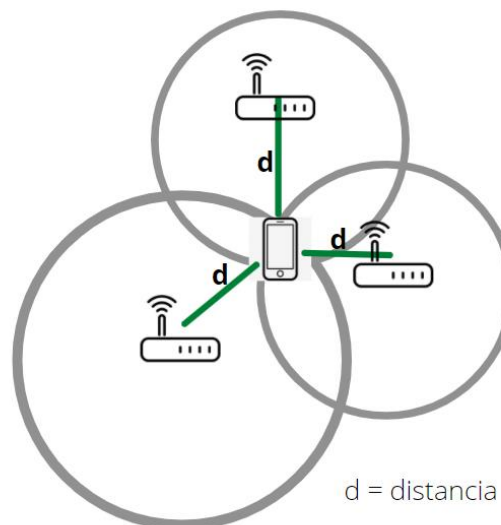


Figura 2-3 Triangulación, basada en [6]



Para encontrar las coordenadas del objetivo a localizar se forman el sistema de ecuaciones que se muestra en la ecuación (1):

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

Resolviendo esta ecuación mediante métodos matemáticos se generan tres ecuaciones similares, cuya intercepción es tomada como la posición del objetivo a localizar.

En la angulación se hace uso de ángulos para determinar la posición de un objetivo, es decir, se hace la ubicación del objeto mediante el cálculo de ángulos relativos a múltiples puntos de referencia. Para dar la ubicación en 3D es necesario contar con una medición de longitud, dos valores de ángulos y el valor de azimut. En el plano 2D para la ubicación es necesario contar con dos medidas de ángulos y una medida de longitud. El bajo procesamiento requerido, el no necesitar hardware adicional, la cantidad de nodos necesarios y la adaptabilidad a varios escenarios la convierten en una técnica de fácil implementación sin embargo su baja exactitud es una gran desventaja por lo que suele trabajar en conjunto con otras técnicas para aumentar su funcionamiento.

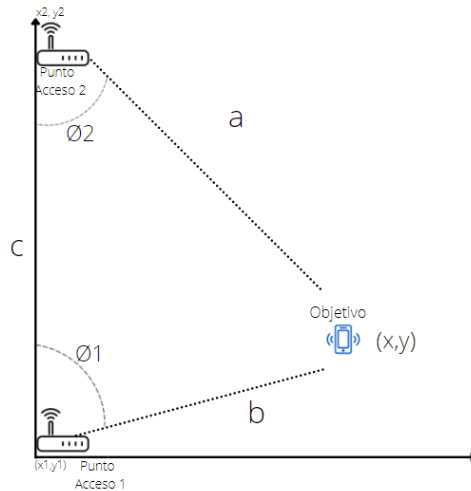


Figura 2-4 Angulación para 2D, basada en [6]

En la figura 2-4 se tiene un sistema al cual se le aplicara angulación donde la distancia c es conocida y los ángulos ϕ_1 y ϕ_2 se calcula como se muestra en la ecuación (2) y (3) respectivamente:

$$\tan \phi_1 = \frac{y - y_1}{x - x_1} \quad (2)$$

$$\tan \phi_2 = \frac{y - y_2}{x - x_2} \quad (3)$$

2.1.4 Reconocimiento de patrones de radiación: Fingerprinting

En los últimos años los dispositivos electrónicos cuentan con una amplia gama de sensores integrados, es posible detectar una gran variedad de información presente alrededor de los dispositivos. en la literatura se han propuesto diferentes patrones de radiación o también llamados *fingerprintings*, dentro de los cuales se destacan 4 tipos: *fingerprinting* visuales, *fingerprinting* de movimiento, *fingerprinting* de señal y *fingerprinting* híbridas.

- **Fingerprinting visual:** Por la integración en los dispositivos móviles modernos de potentes técnicas para la toma de imágenes y el procesamiento de video, se ha logrado tener una amplia investigación respecto a técnicas de búsqueda visual de elementos como se evidencia en la figura 2-5 donde se hace la búsqueda de un vehículo en una captura de imagen o video. En cuanto a la recuperación de imágenes hay técnicas que se basan en el contenido para tener una imagen de consulta, con la cual se realiza una búsqueda en una base de datos de imágenes, donde se utilizan características visuales como el color, la textura y la forma. Los dispositivos móviles pueden etiquetar este tipo de imágenes con la ubicación y proporcionar información importante para dar la posición del objetivo [6].

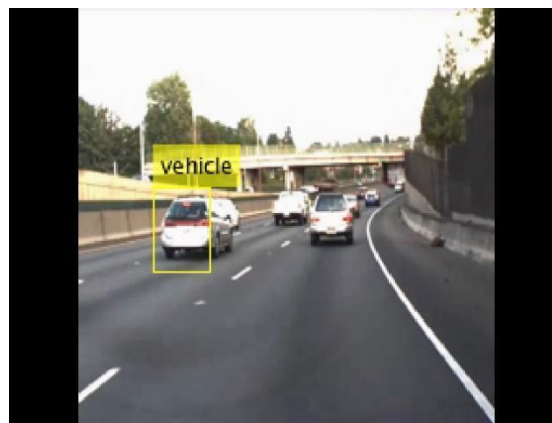


Figura 2-5 Huella digital visual, tomada de [11]

- **Fingerprinting de movimiento:** Con la gran variedad de sensores integrados en los dispositivos electrónicos como acelerómetros, giroscopios, entre otros, es posible hacer la detección y reconocimiento en tiempo real del movimiento de un usuario. Lo que se hace es una combinación de lecturas de sensores y la adición a un mapa del área de interés para dar la ubicación del objetivo. Se realizan lecturas periódicas de los valores tomados por los sensores para utilizarlos como huellas digitales y realizar la estimación de la ubicación.



Con la ayuda de los datos de movimiento no solo es posible usar este tipo de técnicas para realizar la ubicación de un objetivo si no también es posible usarlo como una entrada adicional para mejorar el desempeño de localización en otro tipo de técnicas de posicionamiento [6].

- **Fingerprinting de señal:** Un *fingerprinting* basado en señal se constituye por una dupla datos: el RSSI y la identificación del AP o la estación base (BS, *Base Station*), a la cual se le pueden agregar diferentes tipos de información como identificación de celda, la relación señal a ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*) o también otro tipo de información como la dirección de control de acceso al medio (MAC, *Media Access Control*) de los AP.

Este tipo de técnicas comparan un patrón de señal recibido en un dispositivo por un determinado número de puntos de referencia bien sea puntos de acceso Wi-Fi o BS, con un patrón de señal guardado con anterioridad en una base de datos.

Se ha evidenciado que las técnicas de *fingerprinting* basadas en señal tienen una mayor precisión cuando el entorno tiene complejas condiciones de propagación de las ondas radio, puesto que otras técnicas son considerablemente más afectadas por diversos fenómenos físicos de propagación [6].

Anteriormente *fingerprinting* basada en señal era una técnica propuesta para sistemas de posicionamiento interior pero dado que ahora se cuenta con una alta disponibilidad de puntos de acceso Wi-Fi y de estaciones base, se ha propuesto su utilización para entornos al aire libre [6], [2].

En la figura 2-6 se puede evidenciar un sistema de posicionamiento que emplea *fingerprinting* basado en señal, el diseño y funcionamiento de estos sistemas se explica a continuación.



Figura 2-6 Fingerprinting Wi-Fi tomada de [7]



El objetivo de utilizar esta técnica es descubrir señales que están presentes en el entorno y darle un uso efectivo para estimar la ubicación del objetivo, para estimar la ubicación en los sistemas de posicionamiento en interiores este tipo de técnicas se emplean generalmente en función de RSSI, se cuenta con dos etapas la calibración y la localización.

La etapa de calibración se conoce también como etapa de detección, entrenamiento, fuera de línea, entre otras denominaciones. En dicha etapa se realiza el estudio del sitio donde se ejecuta una recopilación de vectores RSSI de las señales Wi-Fi provenientes de diferentes AP junto con su respectiva dirección MAC, o las coordenadas de los puntos de referencia y otros tipos de datos que puede conformar el vector para tener la suficiente información, este vector se almacena en una base de datos que será utilizada en la siguiente etapa, para facilitar la recolección de esta información el área de estudio se divide por celdas y una estación móvil (MS, *Movile Station*) se mueve por el conjunto de posiciones de las diferentes celdas[8].

La segunda etapa se le conoce como estimación de la posición, coincidencia. En esta etapa se obtiene la posición del objetivo, realizando medidas y formando el vector RSSI de la posición donde se encuentra, dicho vector se envía al servidor del sistema de posicionamiento y se realiza el proceso antes mencionado. Para la recolección de la información se pueden utilizar métodos de aprendizaje automático, donde no se hace una distinción entre LoS y sin línea de visión (NLoS, Non Line of Sight). Se debe tener en cuenta que la señal tomada y por lo tanto el valor de RSSI pueden ser afectados por factores externos, lo cual puede generar errores en la estimación de la posición.

Uno de los inconvenientes de utilizar este tipo de técnicas es el costo en cuanto a tiempo que conlleva la generación de la base de datos [6][8][9].

El *fingerprinting* más utilizado tiene la forma de la ecuación (4):

$$Fi(x, y) = [RSSI_1, RSSI_2, \dots, RSSI_N] \quad (4)$$

Donde $Fi(x, y)$ es la señal que se genera en la posición “i” del objetivo tiene coordenadas (x, y) , $RSSI_N$ Es el valor RSSI en la posición “i” medido desde el AP, BS o punto de referencia y N es el número de AP, BS o punto de referencia. A lo largo del tiempo, han surgido diversas formas de organizar los vectores que utilizan distintos sistemas ya existentes, donde no solo se registra el RSSI si no también la dirección MAC del AP como lo muestra la ecuación (5):

$$F(x, y) = ([MAC_1, RSSI_1], \dots, [MAC_N, RSSI_N]) \quad (5)$$



También algunos sistemas utilizan como información adicional el valor de SNR conformando el vector de la ecuación (6):

$$F(x, y) = ([RSSI_1, SNR_1], \dots, [RSSI_N, SNR_N]) \quad (6)$$

Si bien en la teoría este tipo de técnicas tienen un funcionamiento correcto, en la implementación, las señales recibidas pueden ser afectadas por diversos fenómenos de propagación como lo son la difracción, la reflexión y la dispersión los cuales se deben mitigar al máximo [6][9].

Para la coincidencia de *fingerprinting* generalmente se usa un algoritmo el cual se basa en el cálculo de la distancia euclidiana, lo que hace dicho algoritmo es una medición de distancias euclidianas entre el *fingerprinting* registrado y el *fingerprinting* almacenado en la base de datos. Esta distancia se calcula como se muestra en la ecuación (7):

$$Dist = \sqrt{\sum_{i=1}^N (RSSI_{RL} - RSSI_{ML}(i))^2} \quad (7)$$

Donde N es el número de AP, BS o puntos de referencia existentes, $RSSI_{RL}$ es el vector en la ubicación de referencia o el valor previamente almacenado y $RSSI_{ML}$ Es el valor medido en la ubicación en tiempo real.

La distancia euclidiana hace referencia a la cercanía que tiene la huella de consulta con cada una de las huellas que se encuentran en la base de datos, una vez finaliza este proceso se utiliza el algoritmo de K-vecinos más cercanos (K-NN, *k-nearest neighbors*) para así dar la estimación de la posición de acuerdo con las coordenadas que tenga dicha *fingerprinting*.

Al aumentar el área de cobertura del entorno de trabajo del sistema también se aumenta el tamaño de la base de datos, por lo tanto, al solicitar una ubicación al sistema, este se torna ineficaz debido a la gran cantidad de datos a analizar, por tal motivo es necesario hacer una disminución del área de trabajo del sistema, en la literatura se han propuesto varios métodos para lograr esta disminución. Pero el más utilizado de los métodos es hacer la selección del AP del cual se reciba la señal con mayor fuerza en la huella de consulta y encontrar todas las huellas en la base de datos relacionadas con dicho AP.

Para la parte de llenado de *fingerprinting* existen dos técnicas que se utilizan para realizar la creación del mapa de señal: detección de guerra y conducción de guerra, la primera de estas es la técnica más común, donde se hace la recopilación de coordenadas de la ubicación y los valores RSSI respectivos de los AP, BS, o puntos



de referencia. Estos datos recolectados son utilizados para crear una huella digital exclusiva de esa ubicación [6].

Por otra parte, está la técnica de conducción de guerra basada en cuadrícula cuyo fin es construir un histograma de intensidades de señal para el valor de RSSI recibido de cada estación base en cada ubicación en el *fingerprinting*. Cabe aclarar que para el uso de esta técnica es necesario que el usuario permanezca un tiempo determinado en la ubicación para recopilar la cantidad suficiente de muestras y realizar la construcción del histograma RSSI. Pero esto causaría una sobrecarga de datos y de trabajo, debido a esto se debe dividir el área de interés en celdas donde el histograma se realiza para cada AP, BS o punto de referencia [6].

2.1.4.1 Estructura funcional en bloques de un sistema de localización basado en *fingerprinting*

En la figura 2-7 se muestra la estructura funcional en bloques de un sistema de localización basado en *fingerprinting* donde se evidencian 5 procesos importantes: detección de *fingerprinting*, limpieza de *fingerprinting*, generación de *fingerprinting*, concordancia de *fingerprinting* y llenado de la base de datos de *fingerprinting*.

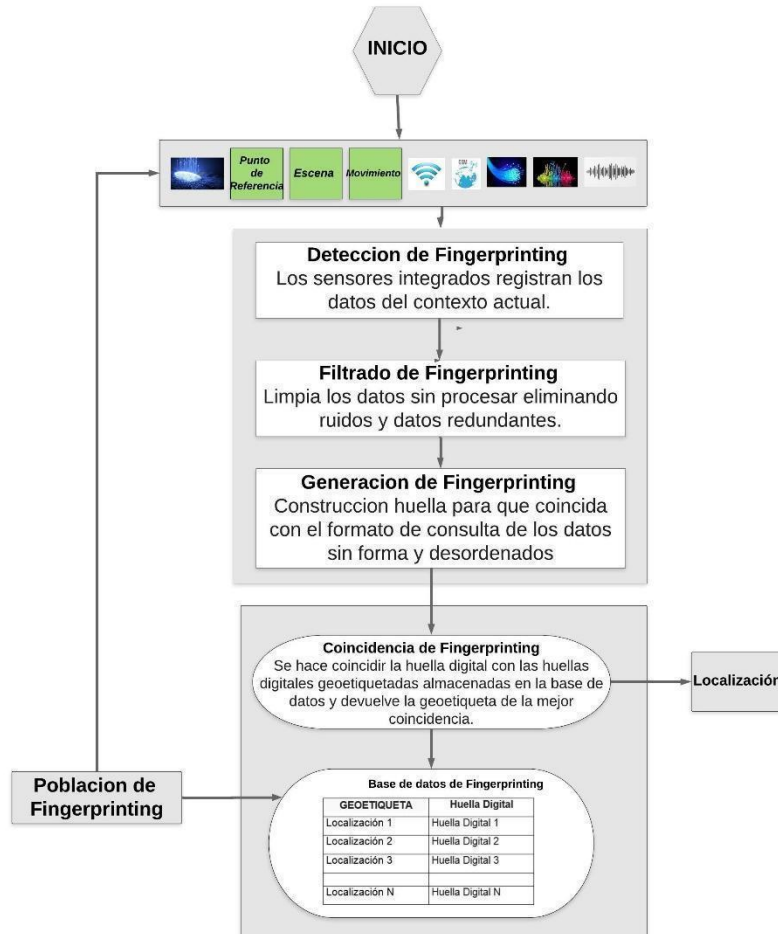


Figura 2-7 Diseño funcional de los sistemas de localización basados en fingerprinting, basado en [6]

- **Detección de *fingerprinting*:** Al iniciarse un sistema los sensores se activan para comenzar el registro de datos bien sea de manera continua o periódica [6].
- **Filtrado/Limpieza de *fingerprinting*:** Los datos recolectados en el bloque de detección generalmente contienen mucho ruido, si esta información es utilizada directamente para realizar el proceso de localización, el sistema va a sufrir una degradación notable en cuanto a latencia, precisión y eficiencia energética. Para evitar este tipo de inconvenientes este bloque hace un proceso de filtrado de los datos antes de ser enviados al siguiente bloque [6].
- **Generación de *fingerprinting*:** Generalmente para capturar los datos de los sensores, se hace de manera desordenada, por lo cual los datos de entrada del bloque de limpieza son organizados en una estructura que puede ser analizada fácilmente. Se construye una consulta de *fingerprinting* digitales para ser enviada al bloque de coincidencia [6].



- **Coincidencia de *fingerprinting*:** dependiendo del tipo de *fingerprinting* que el sistema de posicionamiento utilice se hace necesario variar la técnica de coincidencia. Para tener un mejor desempeño se debe limitar el área de trabajo con lo cual se logra también disminuir el tamaño de la base de datos, esta limitación del área de trabajo es el conocimiento previo que está integrado en la mayoría de los procesos de coincidencia. Posteriormente a esta limitación se utilizan algoritmos de coincidencia para comparar la *fingerprinting* de consulta generada en el bloque de generación de *fingerprinting*'s con las *fingerprinting*'s previamente grabadas en la base de datos y posteriormente estimar la ubicación del objetivo. Este proceso devuelve una coordenada con la ubicación estimada [6].

2.2 Métricas de posicionamiento

Se definen como el parámetro utilizado para la estimación de la posición de un objetivo en un entorno. Para establecer adecuadamente la métrica a utilizar se debe tener en cuenta que esta debe moldearse a los procesos que se describen en la técnica previamente seleccionada.

Existen diversas métricas utilizadas para el posicionamiento para interiores, se analizaron las más utilizados y con los cuales se ha obtenido mejores resultados donde se encuentran Tiempo de Vuelo (ToA, *Time of Arrival*), Ángulo de Llegada (AoA, *Angle of Arrival*), Diferencia en el Tiempo de Vuelo (TDoA, *Time Difference of Arrival*), Indicador de la Intensidad de Señal Recibida (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*), Tiempo de Vuelo de Retorno (RToF, *Return Time of Flight*), Fase de Llegada (PoA, *Phase of Arrival*), y Redes Neuronales, métricas que se describen a continuación:

2.2.1 Tiempo de Vuelo

En esta métrica se mide el tiempo de llegada de la señal desde un transmisor hasta el receptor, es decir la distancia del objetivo se considera directamente proporcional al tiempo de propagación, se implementa generalmente junto a la técnica de triangulación en su derivación de lateración, donde la distancia puede ser calculada utilizando el tiempo de llegada por la velocidad de la luz como se muestra en la ecuación (9) tomando C como la velocidad de la luz ($3 * 10^8 \text{ km/seg}^2$), con lo que se requiere de una sincronización entre el transmisor y el receptor, además de utilizar una etiqueta con la marca de tiempo en la señal transmitida para que así cuando esta llegue al receptor se pueda calcular la distancia que ha viajado la señal. Para esto se pueden utilizar diferentes técnicas de señalización, una de ellas es la medición del espectro ensanchado de secuencia directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*).



$$D = C * (t_{tx} - t_{rx}) \tag{9}$$

Se establece una línea de posición alrededor del transmisor (Tx) en cada estimación de distancia formando una circunferencia donde su centro será el Tx y el radio se tomará como la distancia estimada.

Una vez se tenga la estimación de al menos 3 puntos de referencia para dar la estimación de la posición en sistemas que usen coordenadas en 2 dimensiones y de por lo menos 4 puntos de referencia para planos que usan coordenadas en 3 dimensiones, se procede a determinar la posición donde se puede usar métodos geométricos en los cuales se consideran los puntos de intersección de ToA como se evidencia en la figura 2-8, con los cuales se estima la posición.

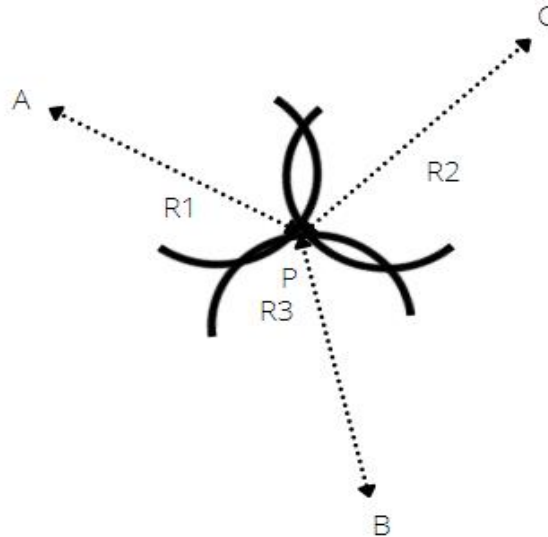


Figura 2-8 Posicionamiento usando ToA, tomada de [7]

El desempeño de estas métricas se ve afectado por el ancho de banda de la señal y la frecuencia de muestreo, pues si el ancho de banda no es lo suficientemente extenso, puede causar un amplio rango de error en la estimación de la distancia. Al implementar ToA en un sistema de posicionamiento en interiores, se pueden filtrar los efectos de múltiples trayectorias, pero debido a todo lo mencionado y a que se necesita de un diseño hardware especial para soportar todos estos procesos lo hace una métrica muy compleja de implementar al igual que costoso [7], [8], [14].

2.2.2 Diferencia en el tiempo de vuelo

Esta métrica se utiliza junto con la técnica de triangulación en su derivación de lateración, en este algoritmo se debe hacer sincronización solo en las unidades de medición (AP, BS) la cual normalmente se realiza por una red troncal.



El dispositivo móvil envía señales a las unidades de medición circundantes como se muestra en la figura 2-9 y se hace una medición en la diferencia de tiempo de llegada de las señales recibidas, esta diferencia en los tiempos de llegada produce una curva hiperbólica donde la intersección de estas curvas se estima como la posición. La ecuación de los hiperboloides se muestra en la ecuación (10).

$$R_{i,j} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + (z_j - z)^2} \quad (10)$$

En (6), las coordenadas del objetivo son representadas por (x, y, z) , y los receptores fijos “i”, “j” son representados por (x_i, y_i, z_i) y (x_j, y_j, z_j) respectivamente, haciendo uso de la expansión de la serie de Taylor se puede linealizar la ecuación (10) y generar un algoritmo iterativo [7].

La precisión de los sistemas que implementan este tipo de algoritmos se ve afectada por la aparición de múltiples rutas de la señal enviada.

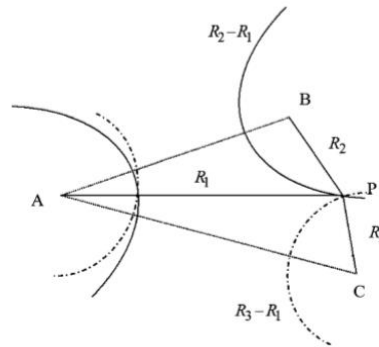


Figura 2-9 Posicionamiento usando TDoA, tomada de [7]

2.2.3 Ángulo de Llegada

Se utiliza generalmente cuando se usa la técnica de triangulación en su derivación de angulación, permite calcular la ubicación del objetivo a partir de la intersección de varios pares de líneas de direcciones de ángulos como se evidencia figura 2-10, para estimar la posición del usuario lo que se hace es comparar la fase de la onda portadora de la señal a través de diferentes antenas. Para realizar la medición de los ángulos existen dos modos, el primero consiste en una antena direccional la cual inspecciona todas las direcciones de interés, el segundo modo es el uso de arreglo de antenas con el cual se utiliza la distancia recorrida por la señal hasta llegar a cada una de estas, debido a que el primer modo necesita de procedimientos mecánicos los cuales son lentos e ineficientes energéticamente se suele utilizar el segundo modo.

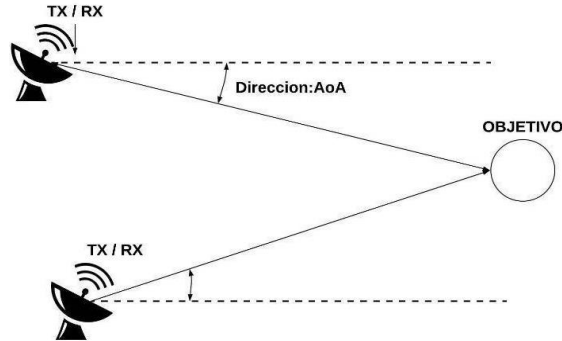


Figura 2-10 Posicionamiento usando AoA, basada de [14]

A diferencia de las métricas implementadas con lateración, en AoA no es necesario tener una sincronización entre AP, BS, unidades de medición. Debido a que la información de temporización del transmisor está codificada y no es posible acceder a esta misma. Los sistemas donde se apliquen este tipo de algoritmos se ven afectados por la aparición de diversos fenómenos de propagación como lo son la aparición de múltiples trayectorias de la señal, la reflexión y NLoS entre otros fenómenos con lo cual se puede ver degradada la precisión del sistema [4], [7], [13],[14].

2.2.4 Indicador de la intensidad de señal recibida

A diferencia de las métricas mencionadas anteriormente, RSSI no necesariamente necesita de la existencia de un canal con LoS, evitando así la aparición de efectos como la multitrayectoria, debido a fallas en el tiempo de vuelo y el ángulo de la señal.

Es por esto, que se estudió un nuevo enfoque donde se calcula la distancia del objetivo o nodo desconocido hasta el AP, BS o nodo de referencia como se le llamaría en este caso, haciendo uso de mediciones de la atenuación de la señal emitida. Si se tiene en cuenta que la potencia de la señal disminuye con la distancia que esta misma recorre se puede determinar la distancia entre el nodo de referencia y el dispositivo móvil como se muestra en la figura 2-11. Para este tipo de algoritmos no es necesario el uso de hardware especializado adicional en los dispositivos móviles, además de la tarjeta de red inalámbrica. Esta técnica es usada generalmente en los sistemas de posicionamiento ya que permite estimar la posición usando cualquier nodo emisor de señal inalámbrica.

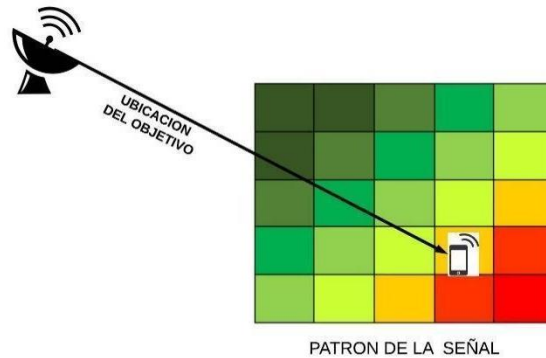


Figura 2-11 Posicionamiento usando RSSI, basada en [14]

La precisión de estos sistemas depende del tamaño con el que son formadas las celdas, para el cálculo de la posición con este algoritmo es necesario contar con 3 puntos de referencia y las pérdidas de trayectoria de la señal debido a la propagación de la señal enviada.

Para el cálculo de la distancia cuya ecuación se describe en la ecuación (11), generalmente se usa el modelo de pendiente única el cual se basa en la distancia y la frecuencia, una ventaja del uso de este modelo es la reducción de errores al tomar las medidas así mismo permite la modificación de parámetros de acuerdo con el escenario donde se implemente.

$$L(\text{dbm}) = L_0 + 10n \text{Log } d(m) \quad (11)$$

Donde L_0 es la referencia de pérdidas a 1m de distancia, y d es la distancia entre los dispositivos y n es el indicador de la variación de potencia con la distancia. L_0 y n dependiendo el entorno de propagación varían [6]. Además, se debe tener en cuenta la ecuación de balance del enlace mostrada en la ecuación (12), la cual al combinarla con la anterior ecuación tiene como resultado la relación entre la distancia y el valor de RSSI ecuación (1) donde n es la atenuación correspondiente a cada escenario y $A(\text{dbm})$ es la intensidad de la señal a 1 m [31].

$$\text{RSSI}(\text{dbm}) = G_{Tx} + P_{Tx} - L \quad (12)$$

$$\text{RSSI}(\text{dbm}) = A(\text{dbm}) - 10 n \text{Log } d(m) \quad (13)$$

Despejando la ecuación (13), se obtiene la distancia expresada en la ecuación (14).

$$d(m) = 10^{\left(\frac{\text{RSSI}(\text{dbm}) - A(\text{dbm})}{-10n}\right)} \quad (14)$$



Como desventaja en el uso de esta métrica para sistemas de posicionamiento en interiores es que, debido a la presencia repentina de obstáculos en el entorno de funcionamiento del sistema, el coeficiente de atenuación se modifica para las señales de RF. Debido a esto establecer un modelo de propagación preciso en interiores se dificulta [7], [12], [14].

El uso de RSSI como métrica en los sistemas de posicionamiento interior presenta retos bien sea derivados de hardware y otros que son derivados de las características propias de la señal.

Dentro de los problemas que se pueden aparecer derivados del hardware está el que se presente un intervalo de sensibilidad insuficiente ya que esto puede ser un problema para discernir una posición. Lo cual se tendrá dos puntos en el entorno con igual valor de RSSI, pero distinta distancia hasta el AP o punto de referencia como se muestra en la figura 2-12.

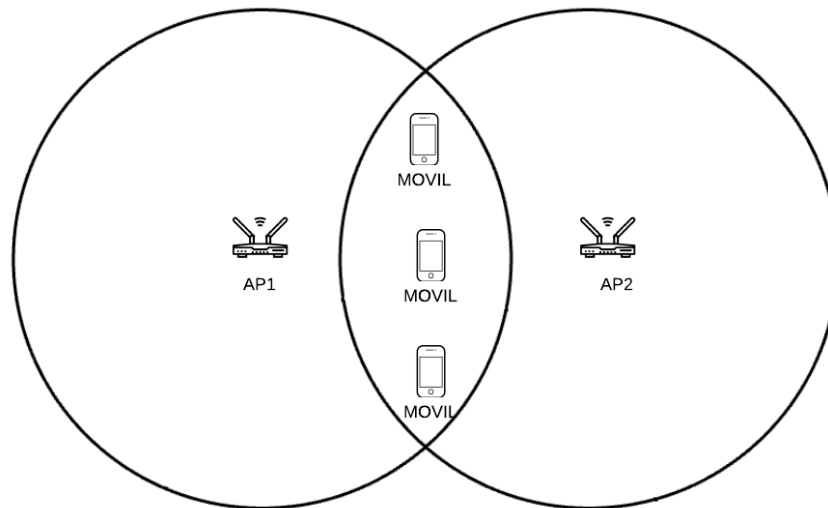


Figura 2-12 Mismo valor de RSSI distintas posiciones, basado en [28]

Otro de los problemas que se puede presentar con el uso de RSSI como métrica es que la escala de valores RSSI sea insuficiente, ocasionando al sistema una baja exactitud, puesto que al no tener valores para representar todos los niveles de señal ocurriría igual que en el caso anterior se van a encontrar varios puntos en el entorno con un mismo valor de RSSI. También podría presentarse problemas con los valores de RSSI si se usan equipos de distintos fabricantes puesto que cada fabricante establece su intervalo de sensibilidad, así mismo el rango de valores de RSSI que utilizara. Lo que quiere decir que un valor de RSSI podría tener una representación diferente en unidades de “dbm” en diferentes dispositivos aun estando en la misma posición con lo cual podría presentarse errores en el posicionamiento. Por otra parte, se pueden presentar problemas derivados del entorno donde se encontrará la interferencia con otros dispositivos Wi-Fi, ya que pueden existir redes transmitiendo en el mismo canal ocasionando una alteración en el



valor de la intensidad de la señal cambiando así el valor de RSSI recibido. Otro problema que se puede presentar debido al entorno es la fluctuación de la señal, lo que ocasiona que incluso al tomar la medida en un mismo punto la intensidad percibida sea distinta. Esto puede producirse por tres factores: cambios en el entorno (movimiento de personas, muebles, entre otros), ruido creado por otros dispositivos de radiofrecuencia y el efecto multicamino [28].

2.2.5 Tiempo de vuelo de retorno

Se realiza la medición del tiempo de vuelo de la señal enviada desde el transmisor hasta el objetivo y viceversa. A diferencia de ToA se tiene un requisito de sincronización de reloj relativo moderado. El objetivo se considera como un radar común, un transpondedor responde a la señal de un radar de interrogación y es ahí donde las unidades de medición (AP, BS) miden el tiempo de ida y regreso de la señal. Para estimar la ubicación del objetivo se pueden usar las mismas técnicas que se usan con ToA.

2.2.6 Fase de Llegada

Esta métrica hace uso de la fase de la onda portadora de la señal recibida para la estimación de la distancia del objetivo, suponiendo que todos los transmisores emiten señales sinusoidales puras de igual frecuencia, con desfase cero, se puede hacer la determinación de la fase de la señal recibida en el objetivo, para esto a cada transmisor de la señal emitida se le debe asignar un retardo de tránsito finito. Al necesitar de LoS para una adecuada exactitud se convierte en una métrica difícil de implementar en interiores.

Como se muestra en la figura 2-13 los transmisores que en este caso están representados con las letras A, B, C y D, mandan la señal hacia la tarjeta de localización la cual analiza la fase de estas y realiza la estimación de la localización del objetivo.

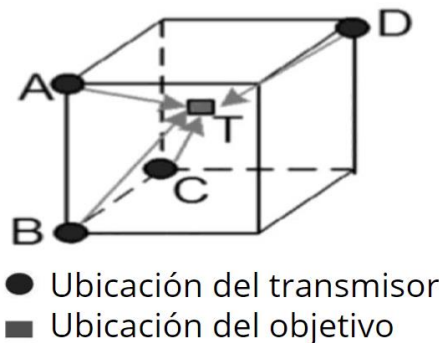


Figura 2-13 Posicionamiento usando PoA, tomada de [7]



2.2.5 Redes neuronales

Pueden ser utilizados tanto en problemas de clasificación como en problemas de aproximación funcional, se caracterizan por la rapidez de la ejecución y los resultados eficientes en la resolución de problemas donde la solución no está completamente definida o es de difícil obtención matemática.

En estos algoritmos es necesario contar con una fase de entrenamiento para adquirir el conocimiento requerido por la red neuronal. Si las redes neuronales son utilizadas junto con la técnica de *fingerprinting* de señal, los vectores recolectados en el entorno actúan como patrones de entrenamiento en la red neuronal

En la figura 2-14 se evidencia un ejemplo de una red neuronal con 3 entradas de información y 2 posibles soluciones. [12].

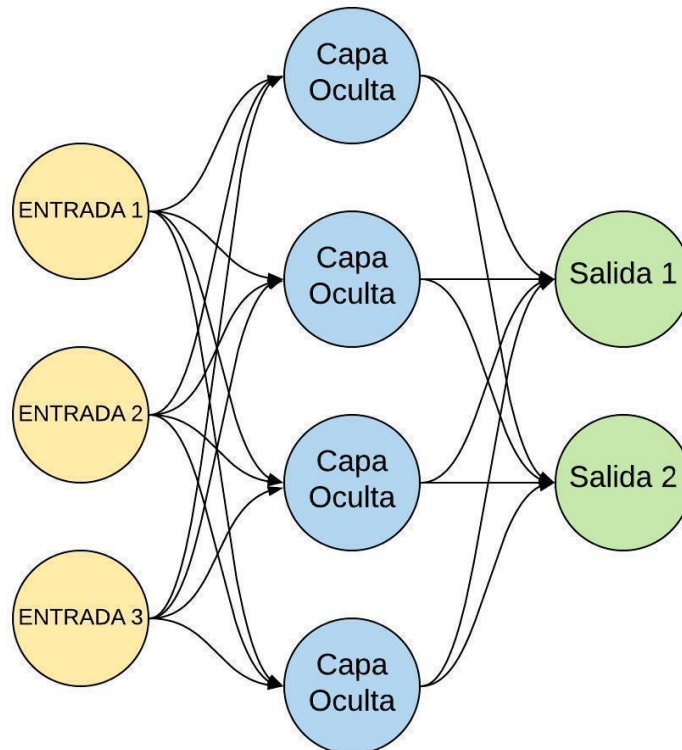


Figura 2-14 Ejemplo red neuronal.



CAPÍTULO 3 DISEÑO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO

Para diseñar el sistema de posicionamiento en interiores se utilizó la metodología Proceso Unificado Racional (RUP, *Rational Unified Process*), usada para la ingeniería de software y adaptada a las necesidades que se pretenden suplir con el sistema de posicionamiento en interiores. La estructura básica de esta metodología se muestra a en la figura 3-1.

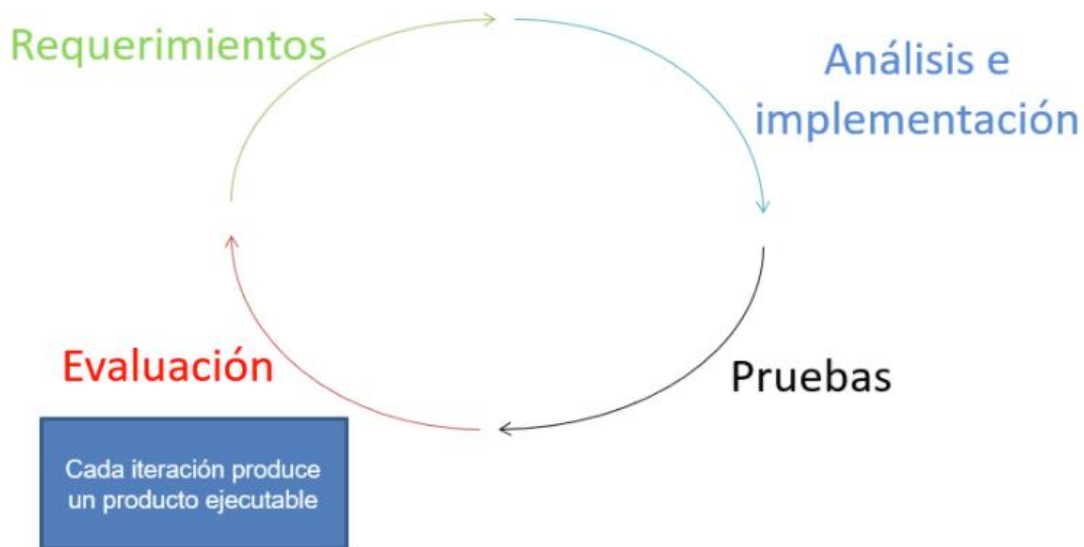


Figura 3-1 Estructura metodológica RUP, tomada de [35]

3.1 Requerimientos

Siguiendo los lineamientos de la metodología RUP para la construcción del sistema se debe tener claro los requerimientos que tendrá este mismo, los cuales deben ser acordes a las necesidades del sistema de posicionamiento en interiores, dichos requerimientos se describen a continuación:

❖ Requerimientos del sistema:

1. El sistema tendrá la capacidad de adaptarse a cualquier escenario *indoor* asegurando la cobertura.
2. El sistema debe operar con la menor cantidad de dispositivos Wi-Fi, garantizando un desempeño adecuado.



3. El sistema debe tener la capacidad de operar con cualquier tipo de dispositivo Wi-Fi.
4. El sistema tendrá una precisión de al menos el 95% en cualquier escenario *indoor*.
5. El sistema debe ser escalable.

3.2 Diseño e Implementación

En la figura 3-2 se muestra el diagrama de bloques general de los sistemas de posicionamiento en los cuales se basa el sistema propuesto.

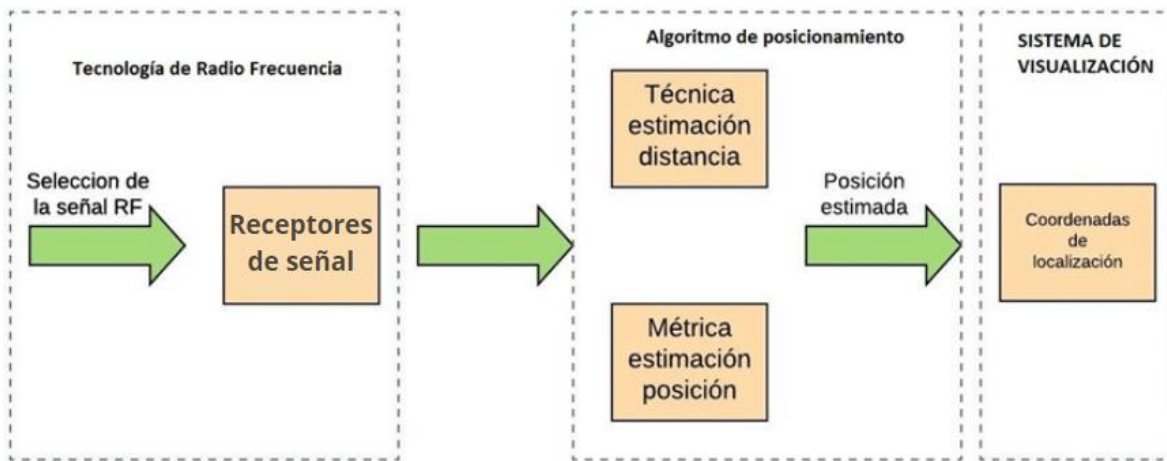


Figura 3-2 Diagrama de bloques general de los sistemas de posicionamiento, basada de [28]

En la primera de las 3 secciones se recolectan las señales recibidas mediante los receptores, este primer bloque se lo conoce como tecnología RF, la siguiente sección llamada Algoritmo de posicionamiento es la encargada de procesar la información obtenida, una vez procesada esta información se obtiene la métrica y se ejecuta la técnica de localización para así realizar la estimación de la posición y en la última sección mediante una interfaz se visualiza las coordenadas del objetivo localizado[32]. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado en la figura 3-3 se propone un diagrama general para el sistema de posicionamiento en interiores empleando Wi-Fi. En este diagrama, el AP genera las señales de radio frecuencia que llegan al dispositivo a localizar, donde se realiza el procesamiento y estimación de la localización. Es de aclarar que un sistema más preciso se requiere más de un generador de señal RF.

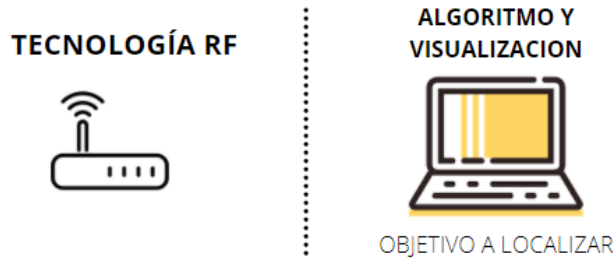


Figura 3-3 Diagrama de bloques general de un sistema de posicionamiento empleando dispositivos Wi-Fi

La figura 3-4 muestra el proceso que realiza el sistema para estimar una posición, los dispositivos emisores de señales Wi-Fi envían constantemente tramas las cuales son capturadas por el objetivo a localizar, el cual examina los campos de esta trama identificando el SSID y el RSSI, una vez obtenidos estos valores se ejecuta el algoritmo de posicionamiento, estimando la posición y se muestra las coordenadas obtenidas mediante la interfaz de usuario.

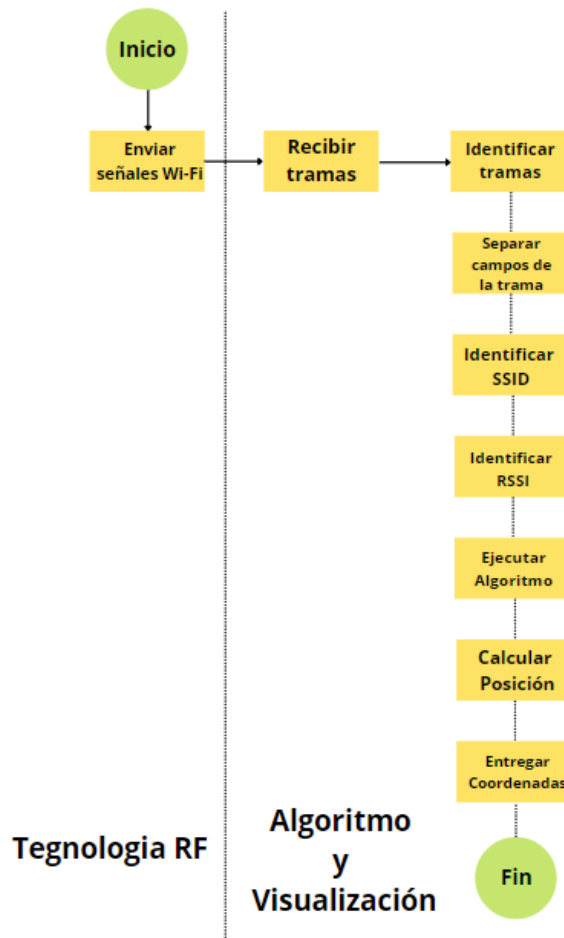


Figura 3-4 Diagrama de flujo general de un sistema de posicionamiento empleando dispositivos Wi-Fi



Para el diseño del bloque de algoritmo y visualización se realiza un diagrama de flujo teniendo en cuenta las técnicas seleccionadas para el sistema de posicionamiento en interiores mostrado en la figura 3-5.

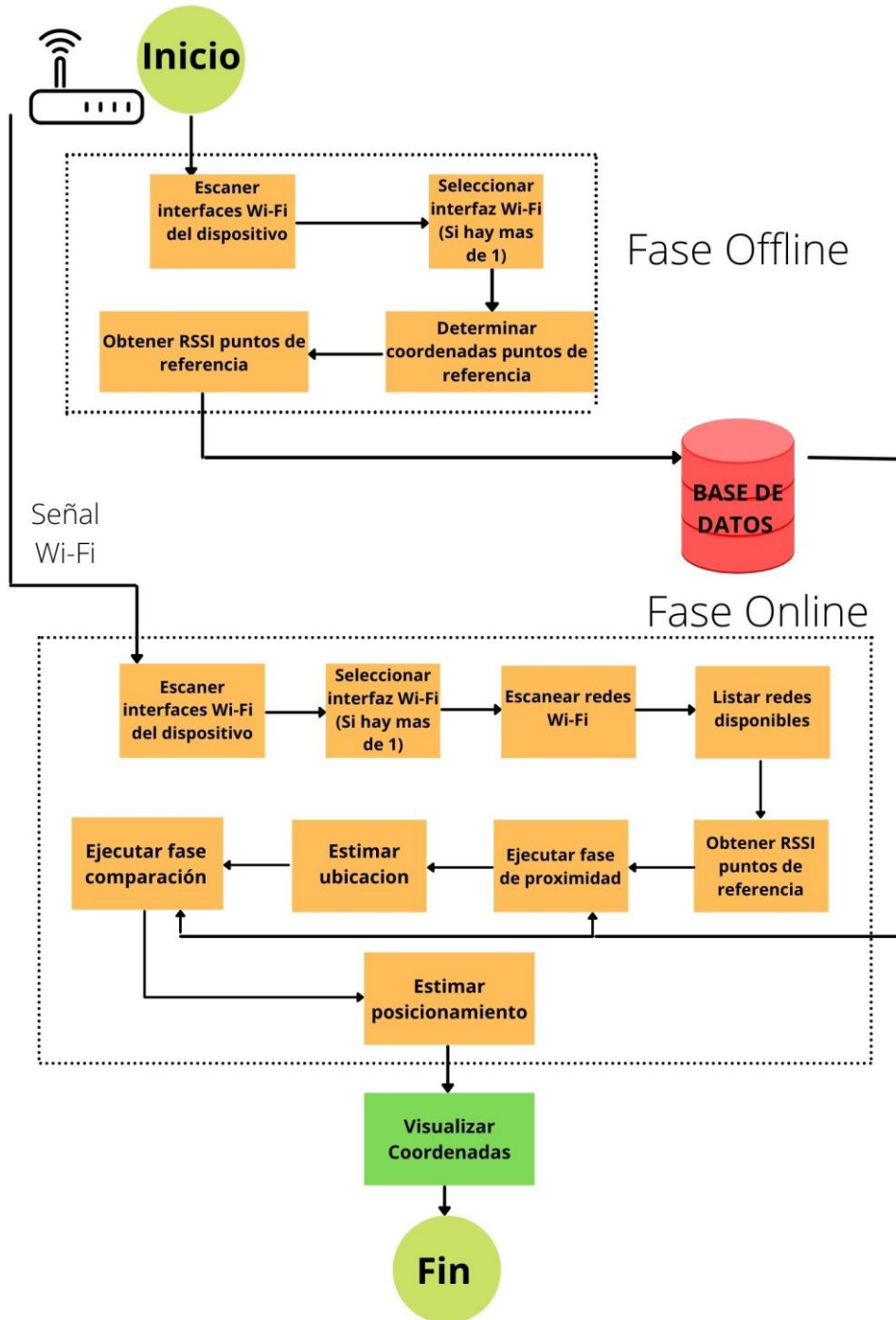


Figura 3-5 Diagrama de flujo para implementación del sistema.



3.2.1 Hardware y Software

Para la implementación de los bloques del sistema es necesario describir los dispositivos hardware encargados del envío y la recepción de los datos, de igual manera las herramientas software utilizadas para la gestión de la información.

3.2.1.1 Dispositivos Hardware

Debido que la implementación se realizaría en un entorno cerrado dentro de la facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, pero por la pandemia ocasionada por el COVID-19 el entorno se trasladó a un entorno cerrado dentro de la primera planta de una casa de habitación, por lo cual, se trabajara con un dispositivo dispuesto por la empresa CLARO Technicolor TC8503RC para la emisión de señales Wi-Fi. Para el bloque de algoritmo y visualización se trabaja con un computador portátil marca Lenovo con una tarjeta de red Realtek RTL8723BE.

3.2.1.2 Dispositivos Software

Para la recolección y el procesamiento de los datos suministrados por los dispositivos Wi-Fi se emplea el entorno de programación, el cual es un editor de código, compilador y depurador. Este también se utiliza como base de datos. Para la configuración de los dispositivos Wi-Fi se usaron las interfaces que traen ellas integradas las cuales permiten modificar los parámetros usados y necesarios para el sistema.

Conociendo ya el funcionamiento general de un sistema de posicionamiento empleando dispositivos Wi-Fi se procede a seleccionar la técnica y la métrica que mejor se acoplen con la tecnología seleccionada para así cumplir con los requerimientos planteados.

3.2.2 Selección de técnica de estimación

Se muestra la tabla 1, una comparativa de las técnicas mencionadas empleadas en localización, con esta se realiza la selección de la más adecuada para la construcción del sistema de posicionamiento en interior empleando la tecnología Wi-Fi.

TÉCNICA /CARACTERÍSTICA	Proximidad	Análisis de visión	Triangulación	Fingerprinting de señal
-------------------------	------------	--------------------	---------------	-------------------------



Número de dispositivos requeridos.	No especifica	No especifica	Para 2D 2 y para 3D 3	No especifica
Parámetro asociado	RSSI	No especifica	RSII, ToA	RSSI
Necesita de LoS	No	Si	Si	No
Complejidad procesos matemáticos	No/Baja cálculos reducidos	No	Si	Media
Complejidad a nivel computacional (procesamiento)	Bajo	Alto	Alto	Bajo
Uso de algoritmos geométricos o algebraicos	No	No	Si	Si
Basados en medida de distancia	No	No	Si	Si
Requiere uso de Hw adicionales (ej: antenas, cámaras)	Si	Si	Si	Si
Requiere métodos empíricos (mediciones manuales), mano de obra	No	No	No	Si
Requiere un tipo de sincronización (reloj)	No	No	Si	No

Tabla 1: Tabla comparativa de técnicas de posicionamiento.

El uso de técnicas que se basen en el cálculo de distancias y ángulos, las cuales necesitan línea de visión entre emisor y receptor, pueden verse afectados por los diversos obstáculos que se encuentren en el entorno de trabajo, ocasionando así una pérdida total o parcial de la señal, afectando el desempeño de estos mismos. Análisis de visión es una técnica que está en desarrollo y en experimentación debido a que es una técnica encaminada a la innovación [6], además de tener un nivel computacional alto, necesidad de LoS entre el emisor y el receptor de la señal, lo cual afecta al desempeño del sistema. La triangulación es una técnica altamente utilizada en este tipo de sistemas gracias a la compatibilidad con diferentes métricas como AoA, ToA, TDoA dependiendo de la clase que se utilice, por lo cual también va a requerir de tres a cuatro puntos de referencia de acuerdo con la dimensión en la que se esté trabajando, convirtiéndola en una técnica de alto costo de implementación, además de la necesidad de una LoS. Como se evidencia las técnicas de proximidad y *fingerprinting* de señal se convierten en las adecuadas para realizar el sistema de posicionamiento, igualmente la fácil implementación y la baja complejidad son factores que también se tienen en cuenta esto se puede



evidenciar en la tabla 1. Con el uso de la técnica proximidad se busca mitigar las afectaciones por multitrayectoria y los fenómenos físicos de propagación y trabajando en conjunto con *fingerprinting* de señal se busca aumentar la precisión del sistema.

3.2.3 Selección métrica de estimación

La tabla 2 contiene los parámetros que se tuvieron en cuenta para realizar la selección de la métrica adecuada para usar en el sistema de posicionamiento en interiores empleando la tecnología Wi-Fi.

ALGORITMO /CARACTERÍSTICA	RSSI	AOA	TOA	TDOA	RToF	PoA	Redes Neuronales
Requiere un tipo de sincronización (reloj)	No	No	Si	Si	Si	Si	No
Requiere uso de HW adicional	No	Si	Si	Si	Si	Si	No
Complejidad procesos matemáticos	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Necesita de LoS	No	Si	Si	Si	Si	Si	No
Uso de algoritmos geométricos o algebraicos	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Tabla 2: Tabla comparativa de métricas de posicionamiento

AoA a pesar de no requerir de un reloj de sincronización si requiere de hardware adicional, tiene complejidad en los procesos matemáticos empleados, así como la necesidad de la existencia de LoS, la hacen una técnica no apta para la implementación. ToA, TDoA, RToF y PoA, tienen un análisis similar sin embargo esos si requieren de un reloj de sincronización para la implementación del sistema.

De acuerdo con lo evidenciado en la Tabla 2 y teniendo en cuenta las técnicas seleccionadas y la tecnología empleada, se considera a RSSI como la mejor opción para implementar el sistema de posicionamiento en interiores, debido a la poca complejidad a la hora de implementarla en el sistema, puesto que no requiere de sincronización, o la no necesidad de LoS y el no uso de hardware adicional en la detección de la señal.

3.3 Implementación

En una primera etapa, se tiene una fase Offline en la cual se deben determinar las coordenadas de referencia dentro del entorno seleccionado. Para definir los puntos de referencia se considera el entorno mostrado en la figura 3-6.

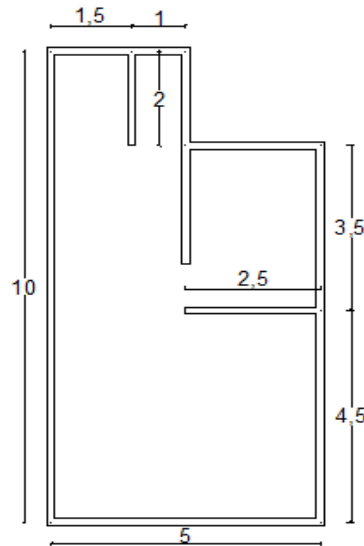


Figura 3-6 Dimensiones del entorno de estudio.

Para la creación de la *fingerprinting* de señal se realizan cuadrículas en el entorno de pruebas, las cuales son divididas en diferentes valores de área tales como $0,25 m^2$ y $1 m^2$, como se muestra en la figura 3-7.



Figura 3-7 División del entorno en cuadrículas.

En cada uno de los puntos ya predefinidos se toman 100 medidas de forma manual del valor de intensidad de señal con las cuales se realiza un promedio ponderado para convertirlo en valor de RSSI, esto se logra ubicando el dispositivo receptor en cada uno de los puntos de referencia, empleando el dispositivo Technicolor TC8305C ubicado en el punto (0,0) en la esquina inferior derecha del entorno de aplicación del sistema, con los cuales se forma un



primer *fingerprinting*, en la figura 3-8 (a) se tiene una huella de $1 m^2$ y en la figura 3-8 (b) se tiene una huella de $0.5 m^2$ las cuales se almacenan en la base de datos del sistema, teniendo así ya todos los requisitos de la fase offline dando paso a la fase online del sistema.

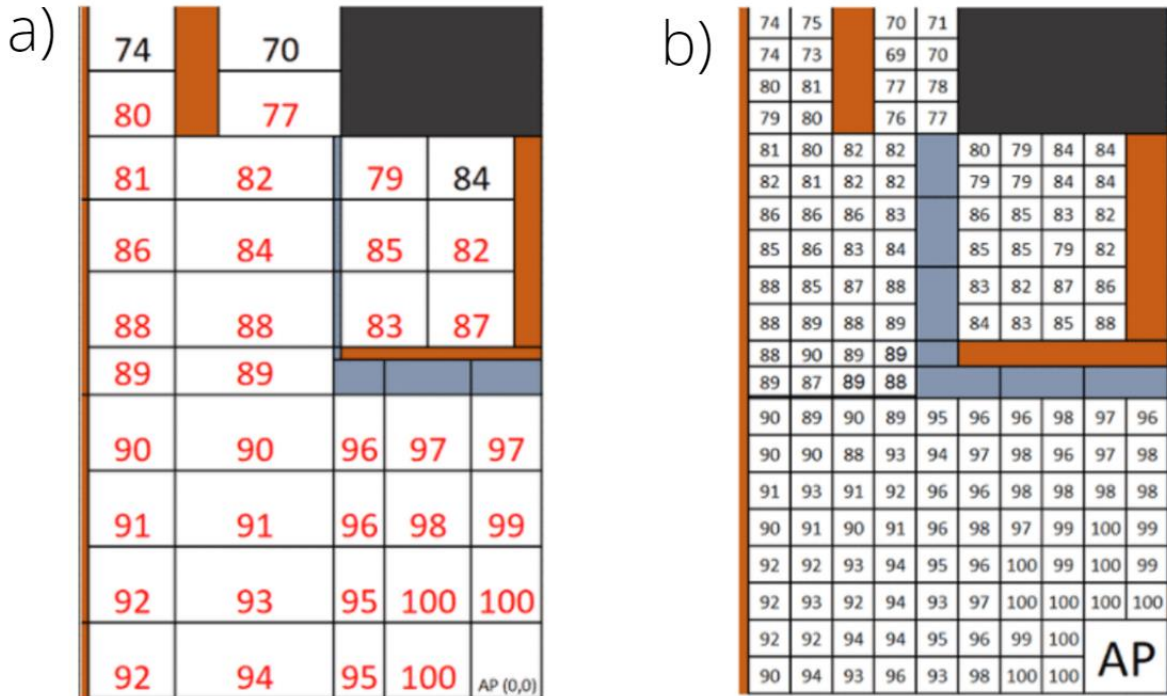


Figura 3-8 Huellas 1 (a) y 0.5 (b) m^2

Se debe tener en cuenta cuál será el sistema operativo seleccionado para trabajar en el sistema de posicionamiento en interiores puesto que según el sistema operativo seleccionado el proceso de escaneo de redes puede variar.

En este caso se ha seleccionado el sistema operativo Windows 8 con el cual mediante la API NATIVA Wi-Fi proporcionada por Windows se puede realizar un escaneo de redes, además, de la obtención del valor RSSI de las diferentes redes escaneadas. Las características de la arquitectura Native 802.11 se evidencia en el apéndice 2.

Una vez se tiene diseñado el sistema se procede a realizar la implementación y evaluación del sistema con los dispositivos hardware mencionados y haciendo uso de las herramientas software.

3.3.1 Dispositivo emisor de señal Wi-Fi



Se decide trabajar con una red Wi-Fi representada por un AP, este será configurado como una red 802.11 del tipo infraestructura con su respectivo identificador que en este caso será el SSID el cual es configurable en estos dispositivos. Además, la red se configura de tal manera que sea capaz de transmitir en canales que entre ellos tenga la menor interferencia con las demás redes existentes en el entorno evitando así un posible deterioro en la señal y un mal funcionamiento del sistema. Para esto se hace uso de una de las propiedades del estándar Wi-Fi el cual proporciona 14 canales de transmisión si se trabaja en la banda de los 2.4GHz donde se cuenta únicamente con 3 canales que no se superponen como lo son los canales 1, 6 y 11 mostrados en la figura 3-9.

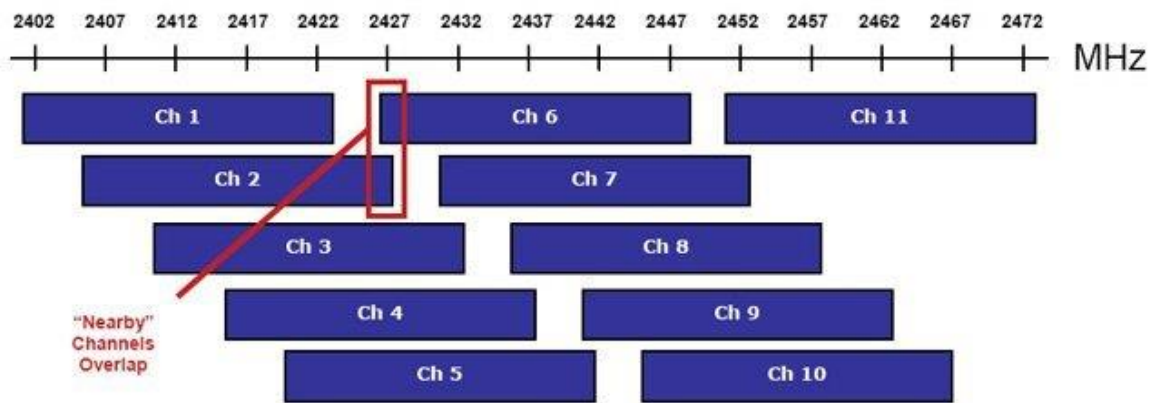


Figura 3-9 Canales Wi-Fi en la banda de 2.4 Ghz, tomada de [15].

3.3.2 Fase Online

La localización del dispositivo móvil se hace mediante la técnica de proximidad, puesto que el sistema arroja como primer parámetro la red que llega con mayor intensidad a la tarjeta de red LAN del dispositivo móvil, una vez se detecta el SSID de la red se informa que esta es la red a la cual el dispositivo móvil se encuentra más cercano y la da como su localización, sabiendo esto se procede a realizar la estimación de la posición mediante el uso de *fingerprinting*. Para esto es necesario realizar una *fingerprinting* de señal tomando medidas en diferentes puntos del entorno.

Una vez se tienen todas las huellas medidas y almacenadas, así como las configuraciones iniciales de los dispositivos Wi-Fi, se procede a probar cada parte del sistema iniciando con la enumeración de interfaces de red disponibles en el dispositivo móvil. Este proceso se realiza a través de la función `WlanEnumInterface`, la cual muestra el número de interfaces disponibles en el dispositivo y el estado en el que estas se encuentran, la estructura y funcionamiento de esta función se muestra en el apéndice 1.



Para la primera prueba se apaga la interfaz inalámbrica como se muestra en la figura 3-10 del dispositivo móvil que en este caso será un computador portátil.

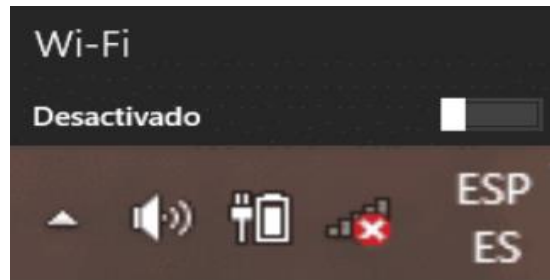


Figura 3-10 Interfaz de red inalámbrica apagada

Con lo cual se obtiene del sistema de posicionamiento el resultado mostrado en la figura 3-11 donde se observa el número de interfaces encontradas por el sistema, así como el estado de no conectada o apagada de la interfaz seleccionada.

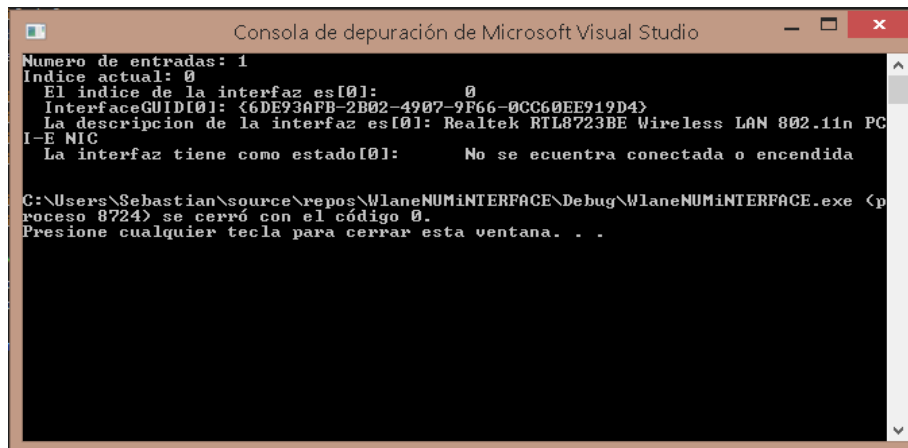


Figura 3-11 Interfaz de red inalámbrica desconectada.

Como se mencionó anteriormente con esta función se obtiene el número de entradas de interfaces inalámbricas que tiene el dispositivo y su descripción, para este caso se cuenta con solo una interfaz de red inalámbrica “Realtek RTL8723BE”. Además de evidenciar que la interfaz no se encuentra conectada o encendida.

3.4 Bosquejo sistema de posicionamiento en interiores empleando Wi-Fi

Una vez se tiene ya establecidos y diseñados los bloques del sistema es posible realizar el planteamiento de un bosquejo general para el sistema de posicionamiento en interiores empleando Wi-Fi mostrado en la figura 3-12.

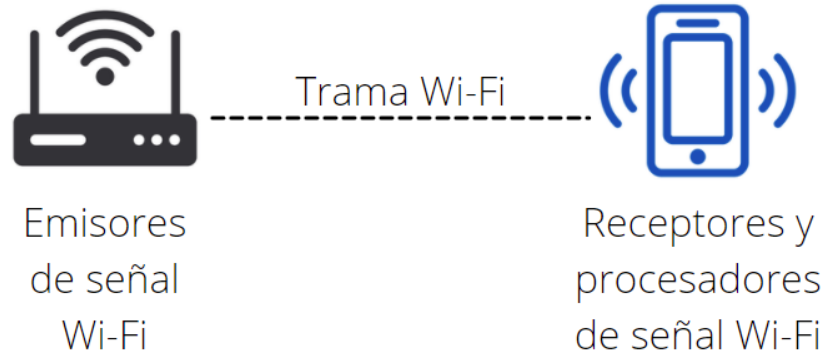


Figura 3-12 Bosquejo general del sistema de posicionamiento empleando Wi-Fi.

3.5 Pruebas

Con el diseño general establecido es posible realizar pruebas de funcionamiento general, se decide trabajar con una cuadrícula de 1 m^2 debido a que con las demás cuadrículas se presentaba una duplicidad de datos elevada provocando así demasiados datos erróneos afectando el desempeño y bajando la precisión del sistema.

La red tiene como SSID "FLIA DAZA". Para realizar estas pruebas el entorno se encuentra dividido como se muestra en la figura 3-13, donde cada campo de la cuadrícula tiene su respectiva coordenada cartesiana.

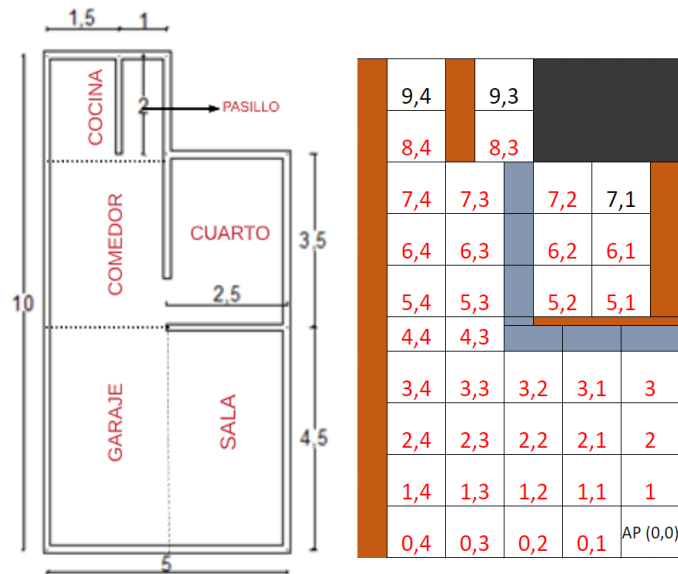


Figura 3-13 División del entorno.

Como primeras consideraciones para la evaluación del sistema, se evalúa el estar o no conectado a la red "FLIA DAZA", una segunda consideración es el área donde



se encuentre el dispositivo móvil dentro del entorno de pruebas, las pruebas realizadas y las descripciones de estas se muestran a continuación:

```
NUMERO DE ENTRADAS : 1
INDICE ACTUAL : 0
INDICE DE LA INTERFAZ [0]: 0
InterfaceGUID[0]: {6DE93AFB-2B02-4907-9F66-0CC60EE919D4}
DESCRIPCION DE LA INTERFAZ [0]: Realtek RTL8723BE Wireless LAN 802.11n PCI-E NIC

ESTADO DE LA INTERFAZ [0]: NO CONECTADA

LA LISTA DE REDES WLAN DISPONIBLES PARA ESTA INTERFAZ ES:
NUMERO DE ENTRADAS: 15

NOMBRE DEL PERFIL[0]: FLIA DAZA
SSID[0]: FLIA DAZA
TIPO DE RED BSS[0]: INFRAESTRUCTURA (1)
NUMERO DE BSSIDs[0]: 1
CONECTABLE[0]: SI
NUMERO DE TIPOS DE PHY ADMITIDOS [0]: 1
CON UN PORCENTAJE DE SENIAL DE: 88 <RSSI: -26.960000 dBm>

SE ENCUENTRA CERCANO A LA RED:
NOMBRE DEL PERFIL[0]: FLIA DAZA
SSID[0]: FLIA DAZA
CON UN PORCENTAJE DE SENIAL DE: 88 <RSSI: -26.960000 dBm>
```

Figura 3-14 Desconectado de la red Wi-Fi.

Como se observa en la figura 3-14 a pesar de no estar conectado a la red de prueba “FLIA DAZA” esta se asigna como la localización del dispositivo móvil con lo cual se prueba su correcto funcionamiento. Igualmente se demuestra que a pesar de que el sistema detecta 15 redes Wi-Fi estas no afectan al correcto funcionamiento del sistema.

3.5.1 Pruebas de localización

Ahora se procede a probar diferentes ubicaciones dentro del entorno. Se analiza si la presencia de otras redes afecta en la localización a este mismo.



Figura 3-15 Dispositivo móvil en punto (2,0) en el área "Sala".

Se ubica el dispositivo móvil en el área denominada como "sala", se muestra en la figura 3-15 el dispositivo ubicado en el punto (2,0) con un valor de RSSI de (-21dbm) y una intensidad de señal de (99%) para la prueba 1.

```

SE ENCUENTRA CERCANO A LA RED:
NOMBRE DEL PERFIL[0]: FLIA DAZA
SSID[0]: FLIA DAZA
CALIDAD DE SENAL[0]: 99 <RSSI: -21 dBm>
Por lo cual estas localizado en:
LA SALA

```

Figura 3-16 Resultado para punto (2,0) prueba 1 en área "Sala".

Como se observa en la figura 3-16 el sistema da una respuesta correcta puesto que tanto el valor de la intensidad de la señal (99%) como el valor del RSSI (-21dbm) corresponden tanto para la fase Offline como en la fase Online. Para este punto se tiene una desviación estándar de 0,71% en cuanto a la intensidad de señal recibida y de 0,52dbm para el valor de RSSI.

Posteriormente se ubica el dispositivo móvil en el punto (3,2) para la prueba 2 del área "sala" como se muestra en la figura 3-17.

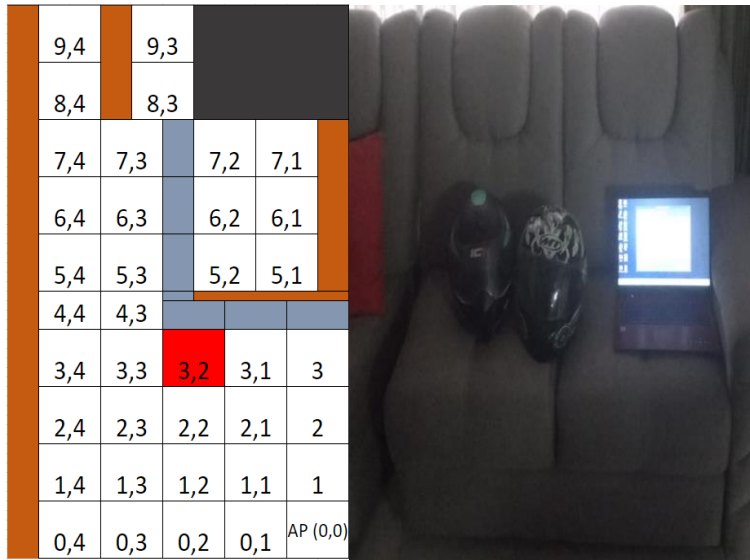


Figura 3-17 Dispositivo móvil en punto (3,2) en el área "Sala".

Para este caso si bien el sistema arroja como localización el área denominada "sala" el valor de la intensidad de la señal (95%) y el valor del RSSI (-23dbm) de la fase Online figura 3-18 no corresponde a los valores almacenados en la Offline (Intensidad de señal = 96%, RSSI= -22.32dbm) teniendo entonces un error de 1 m que es la distancia desde el centro de cada cuadrícula lugar donde se ubica el dispositivo móvil.

```
SE ENCUENTRA CERCANO A LA RED:  
NOMBRE DEL PERFIL[0]: FLIA DAZA  
SSID[0]: FLIA DAZA  
CALIDAD DE SENIAL[0]: 95 (RSSI: -23 dBm)  
Por lo cual estas localizado en:  
LA SALA
```

Figura 3-18 Resultado para punto (3,2) prueba 2 en área "Sala".

Posteriormente se procede a ubicar el dispositivo móvil en diferentes partes de la zona denominada "GARAJE" como se muestra en la figura 3-19 se ubica como primera prueba en este entorno en el punto (0,4) para la prueba 3.

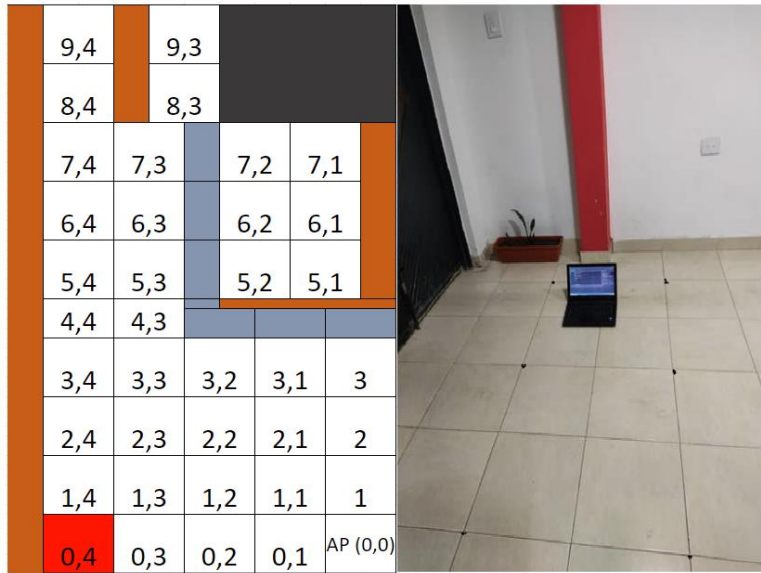


Figura 3-19 Dispositivo móvil en punto (0,4) en el área "Garaje".

Para este caso el punto (0,4) en la fase Offline tiene un valor de intensidad de 92% y un valor de RSSI de -25 dbm, el sistema detecta un valor de intensidad y RSSI similar por lo cual se puede inferir que el sistema tiene un correcto funcionamiento además que se evidencia que da como localización "Garaje" como se muestra en la figura 3-20.

```

SE ENCUENTRA CERCANO A LA RED:
NOMBRE DEL PERFIL[0]: FLIA DAZA
SSID[0]: FLIA DAZA
CALIDAD DE SENIAL[0]: 92 <RSSI: -25 dBm>
Por lo cual estas localizado en:
el garaje de la casa

```

Figura 3-20 Resultado para punto (0,4) prueba 3 en área "Garaje".

Sin embargo, se realiza una prueba 4 en el punto (0,4) arrojando el sistema un valor de intensidad de señal de 94% y un valor de RSSI de -24 dbm como se muestra en la figura 3-21, teniendo entonces un error de 1m debido a que este valor corresponde al punto (0,3).

```

SE ENCUENTRA CERCANO A LA RED:
NOMBRE DEL PERFIL[0]: FLIA DAZA
SSID[0]: FLIA DAZA
CALIDAD DE SENIAL[0]: 94 <RSSI: -24 dBm>
Por lo cual estas localizado en:
el garaje de la casa

```

Figura 3-21 Resultado erróneo para punto (0,4) prueba 4 en área "Garaje".

Seguido de esto se decide probar el funcionamiento del sistema en otra área del entorno, la prueba 5 se realiza en el punto (5,4) dentro del área "Comedor" como se muestra en la figura 3-22.



Figura 3-22 Dispositivo móvil en punto (0,4) en el área "Comedor".

Como resultado de la prueba 5 se obtuvo un funcionamiento correcto donde el porcentaje de señal recibido es del 86% y un valor de RSSI de -29 dbm los cuales coinciden en ambas fases del sistema como se muestra en la figura 3-23.

```
SE ENCUENTRA CERCANO A LA RED:  
NOMBRE DEL PERFIL[0]: FLIA DAZA  
SSID[0]: FLIA DAZA  
CALIDAD DE SENIAL[0]: 86 <RSSI: -29 dBm>  
Por lo cual estas localizado en:  
el comedor de la casa
```

Figura 3-23 Resultado punto (5,4) prueba 4 en área "Comedor".

Como prueba 6 se ubica el dispositivo móvil en el punto (4,3) como se muestra en la figura 3-24, el cual en la fase Offline tiene una intensidad de señal de 89% y un valor de RSSI de -26,38 dbm.



Figura 3-24 Dispositivo móvil en punto (4,3) en el área "Comedor".

Para este caso al tratarse de un punto cercano a otra área el sistema arroja una localización errónea como se muestra en la figura 3-25. Donde da como localización el área garaje con una intensidad de 91% y un valor de RSSI de -26 dbm valores que según la *fingerprinting* inicial corresponden al punto (3,4).

```

SE ENCUENTRA CERCANO A LA RED:
NOMBRE DEL PERFIL[0]: FLIA DAZA
SSID[0]: FLIA DAZA
CALIDAD DE SENIAL[0]: 91 <RSSI: -26 dBm>
Por lo cual estas localizado en:
el garaje de la casa
Se calculara tu posicion

```

Figura 3-25 Funcionamiento errores área "Comedor" prueba 6.

Seguido a esto se procede a evaluar otra división del entorno en este caso se denomina "Cuarto" ubicando el dispositivo móvil en el punto (6,2) para la prueba 7, mostrado en la figura 3-26 cuyo valor de intensidad de señal en la *fingerprinting* almacenada es 85% y un RSSI de -28.9 dbm.

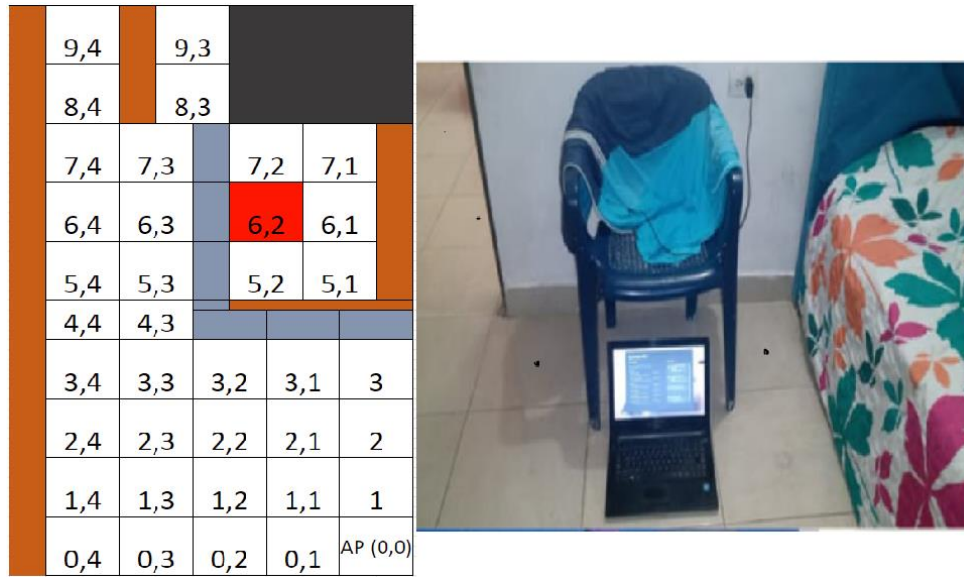


Figura 3-26 Dispositivo móvil en punto (4,3) en el área "Comedor".

En este punto del entorno se tiene un funcionamiento correcto ya que como se evidencia en la figura 3-27 el sistema arroja los valores esperados tanto para intensidad de señal como para valor de RSSI.

```
SE ENCUENTRA CERCANO A LA RED:
NOMBRE DEL PERFIL[0]: FLIA DAZA
SSID[0]: FLIA DAZA
CALIDAD DE SENIAL[0]: 85 (RSSI: -29 dBm)
Por lo cual estas localizado en:
el cuarto de la casa
```

Figura 3-27 Funcionamiento correcto área "Cuarto" prueba 7.

Pasando así a poner a prueba el sistema en la última área asignada en el entorno de prueba, la figura 3-28 muestra las diferentes ubicaciones donde se puso a prueba el sistema en el área denominada como "Pasillo" teniendo resultados óptimos en cada una de estas como se muestra en la figura 3-29.



9,4	9,3				9,4	(9,3) 73% -35,66dbm			
8,4	(8,3) 77% -34dbm				8,4	8,3			
7,4	7,3		7,2	7,1	7,4	7,3		7,2	7,1
6,4	6,3		6,2	6,1	6,4	6,3		6,2	6,1
5,4	5,3		5,2	5,1	5,4	5,3		5,2	5,1
4,4	4,3				4,4	4,3			
3,4	3,3	3,2	3,1	3	3,4	3,3	3,2	3,1	3
2,4	2,3	2,2	2,1	2	2,4	2,3	2,2	2,1	2
1,4	1,3	1,2	1,1	1	1,4	1,3	1,2	1,1	1
0,4	0,3	0,2	0,1	AP (0,0)	0,4	0,3	0,2	0,1	AP (0,0)

Figura 3-28 Dispositivo móvil en el área "Pasillo".

```

SE ENCUENTRA CERCANO A LA RED:
NOMBRE DEL PERFIL[0]: FLIA DAZA
SSID[0]: FLIA DAZA
CALIDAD DE SENIAL[0]: 77 (RSSI: -34 dBm)
Por lo cual estas localizado en:
estas en el pasillo de la casa Se calculara tu posicion

SE ENCUENTRA CERCANO A LA RED:
NOMBRE DEL PERFIL[0]: FLIA DAZA
SSID[0]: FLIA DAZA
CALIDAD DE SENIAL[0]: 73 (RSSI: -36 dBm)
Por lo cual estas localizado en:
estas en el pasillo de la casa Se calculara tu posicion
    
```

Figura 3-29 Correcto funcionamiento en área "Pasillo".

3.5.2 Pruebas de posicionamiento sin interferencia humana

Una vez se prueba el funcionamiento del sistema para la localización se procede realizar la etapa de "posicionamiento", para realizar estas pruebas se tiene en consideración el mismo entorno de pruebas, así como los mismos puntos de referencia para la *fingerprinting*. Para evaluar el comportamiento del sistema se ubica el equipo móvil en cada punto de referencia en las áreas del escenario y así evaluar la precisión alcanzada. En cada punto se tomaron 20 muestras para estimar la desviación estándar. Al realizar estas pruebas a cada punto de referencia de la *fingerprinting* se le asignó una coordenada teniendo en cuenta la coordenada del AP y realizando una conversión teniendo en cuenta los puntos de referencia del entorno (Ver apéndice 3).



Se trabaja con un AP con el SSID "FLIA DAZA", poniendo a prueba el sistema en el área denominada como "Sala" en el punto (2,0) de coordenadas geográficas 2°27'15" N 76°37'57.06281186" W Altitud: 1719 metros, con un RSSI DE -21 dbm y una intensidad de señal de 99% como se puede evidenciar en la figura 3-30.



Figura 3-30 Dispositivo móvil en punto (2,0) en el área "Sala".

Para este punto el sistema funciona de manera adecuada como se evidencia en la figura 3-31 donde la coordenada, los valores de RSSI e intensidad de señal corresponden a los obtenidos en la fase Offline con una desviación estándar de 0 teniendo una precisión del 100% para esta prueba.

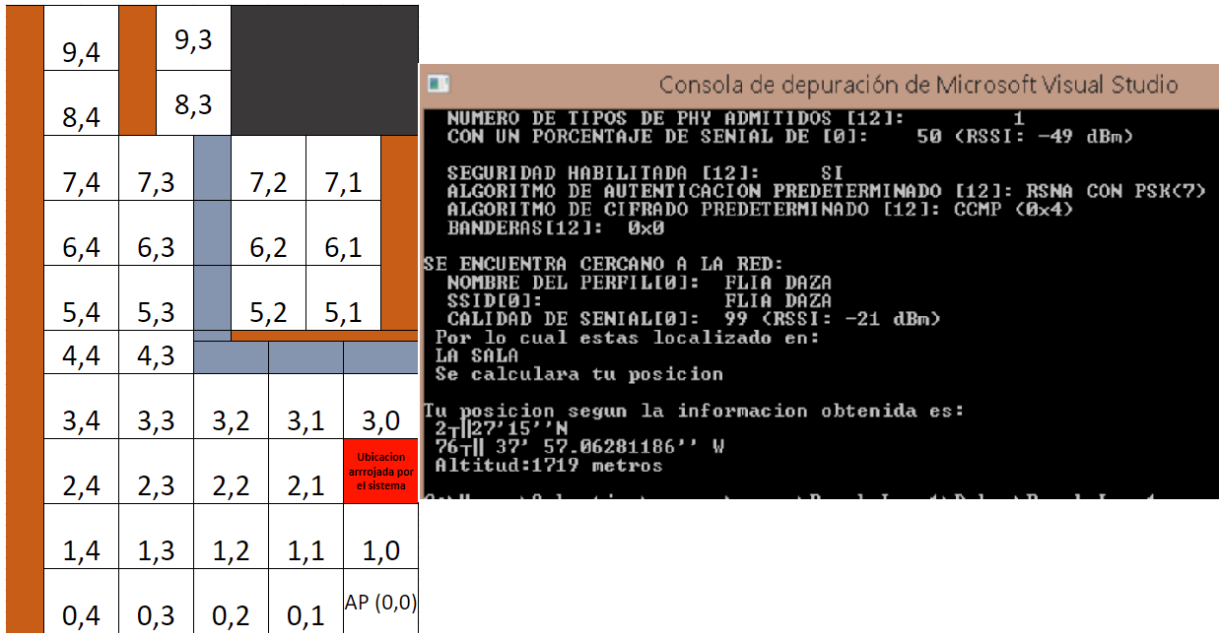


Figura 3-31 Posicionamiento en punto (2,0)

Seguido a esto se procede a ubicar el dispositivo en el punto (3,2) donde el valor de RSSI es de -22,32 dbm, intensidad de señal es de 96% como se indica en la figura 3-32 y coordenadas 2°27'15.05762188" N 76°37'57.07022348" W altitud 1719 metros.

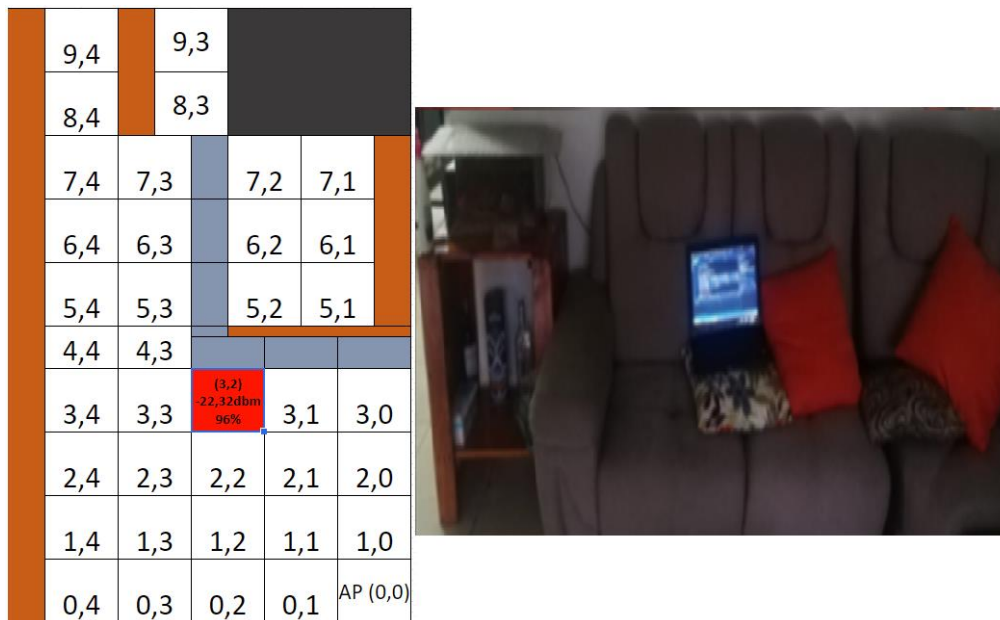


Figura 3-32 Dispositivo móvil en punto (3,2) en el área "Sala".



En este caso el sistema a pesar de dar como posicionamiento las coordenadas del punto (3,2) del entorno también da como posicionamiento las coordenadas del punto (2,2) como se muestra en la figura 3-33 mostrando también que se tiene un desfase de hasta un metro respecto a la posición lo que nos indica una desviación estándar de 0.54 metros.

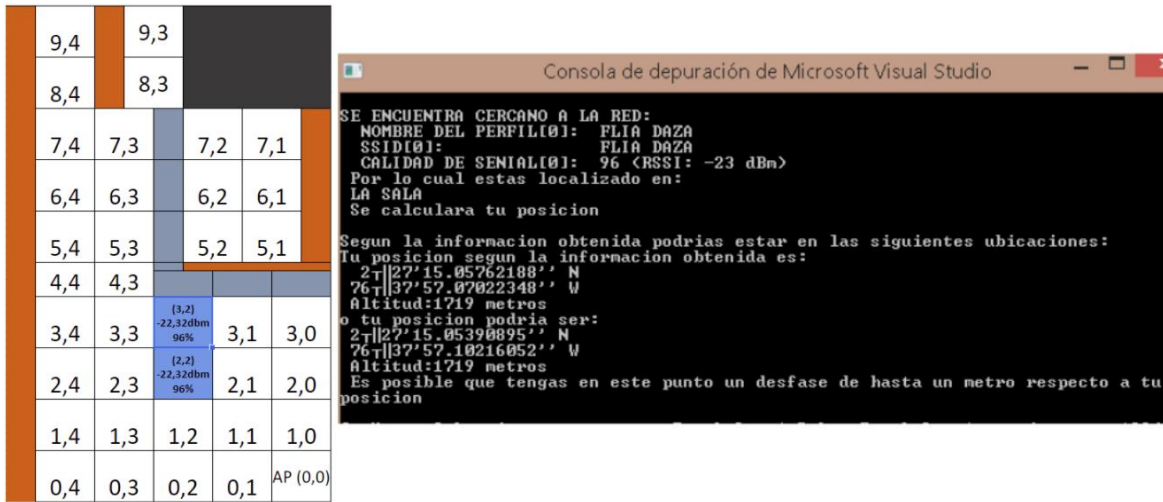


Figura 3-33 Posicionamiento en punto (2,0).

Seguido a esto se procede a hacer las pruebas en el espacio denominado como “Garaje” en el punto (0,3) con coordenadas 2°27’15.09759529” N 76°37’57.04056271 W altitud 1719 metros con un valor de RSSI de -23,48 dbm y un porcentaje de intensidad de señal de 94% como se muestra en la figura 3-34.

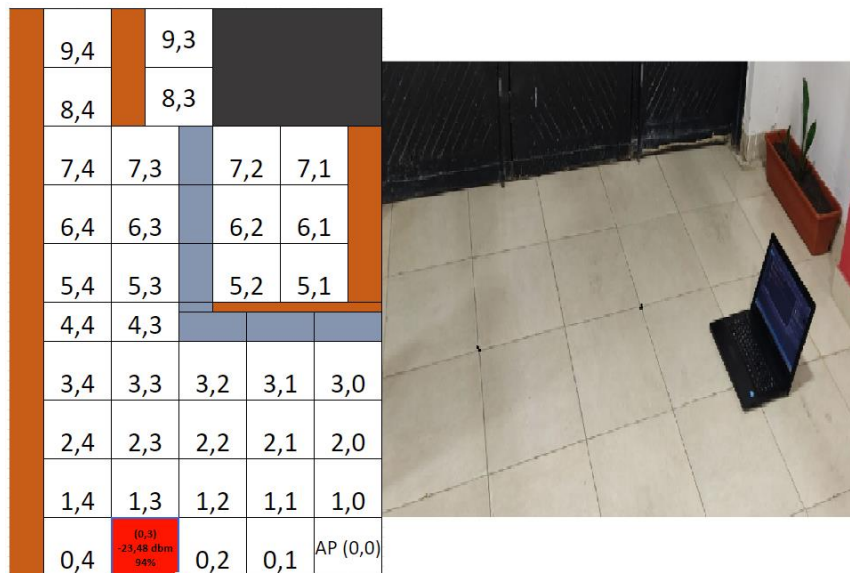


Figura 3-34 Dispositivo móvil en punto (0,3) en el área "Garaje".



Para este punto el sistema funciona de manera adecuada como se evidencia en la figura 3-35 donde las coordenadas y los valores de RSSI e intensidad de señal corresponden a los obtenidos en la fase Offline con una precisión del 100%.

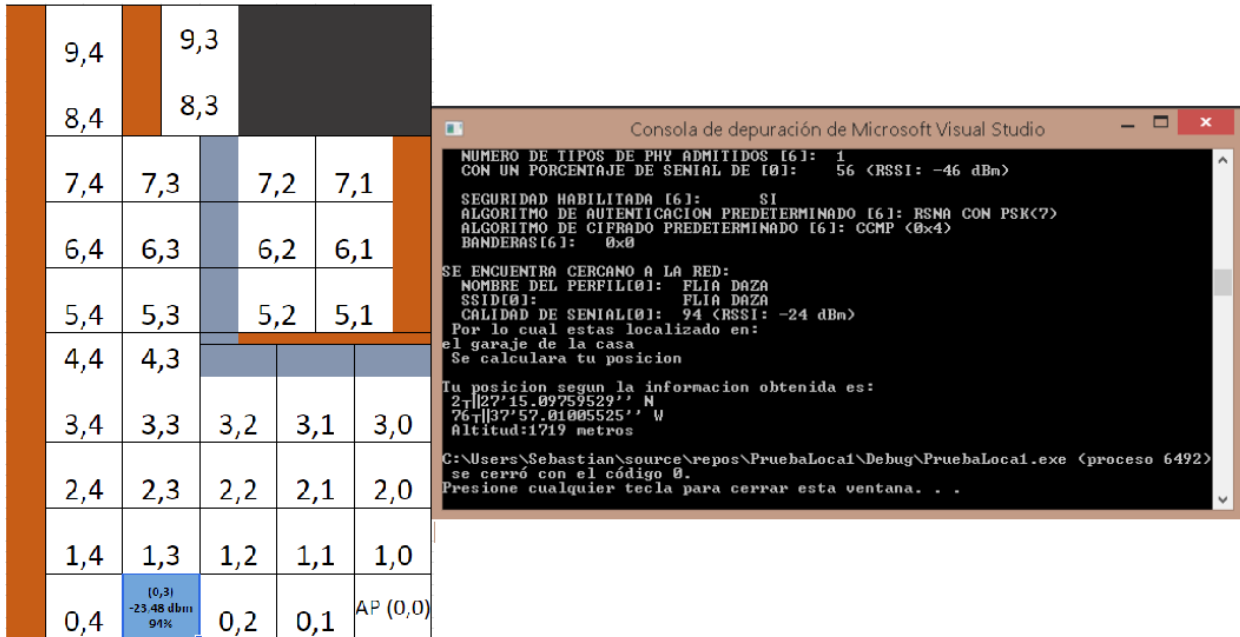


Figura 3-35 Posicionamiento en punto (0,3).

La siguiente prueba se realizó en el punto (2,4) con coordenadas 2°27'15.12271695" N 76°37'57.07763516" W altitud 1719 metros, el cual tiene una intensidad de señal de 91% y un valor de RSSI de -25,22 dbm como se muestra en la figura 3-36, sin embargo, en este punto el sistema arroja las coordenadas tanto del punto (2,4) como la del punto (2,3) como se muestra en la figura 3-37 lo que nos indica una desviación estándar de 0.615 metros.

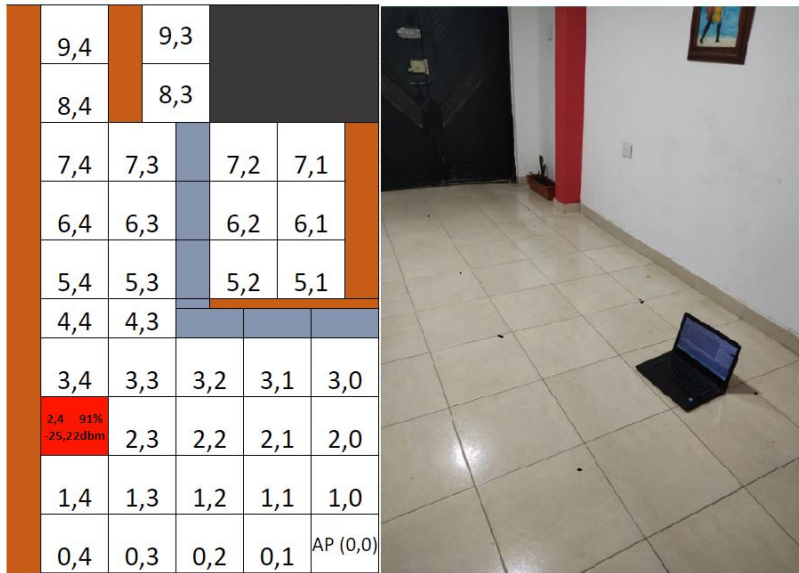


Figura 3-36 Dispositivo móvil en punto (2,4) en el área "Garaje".

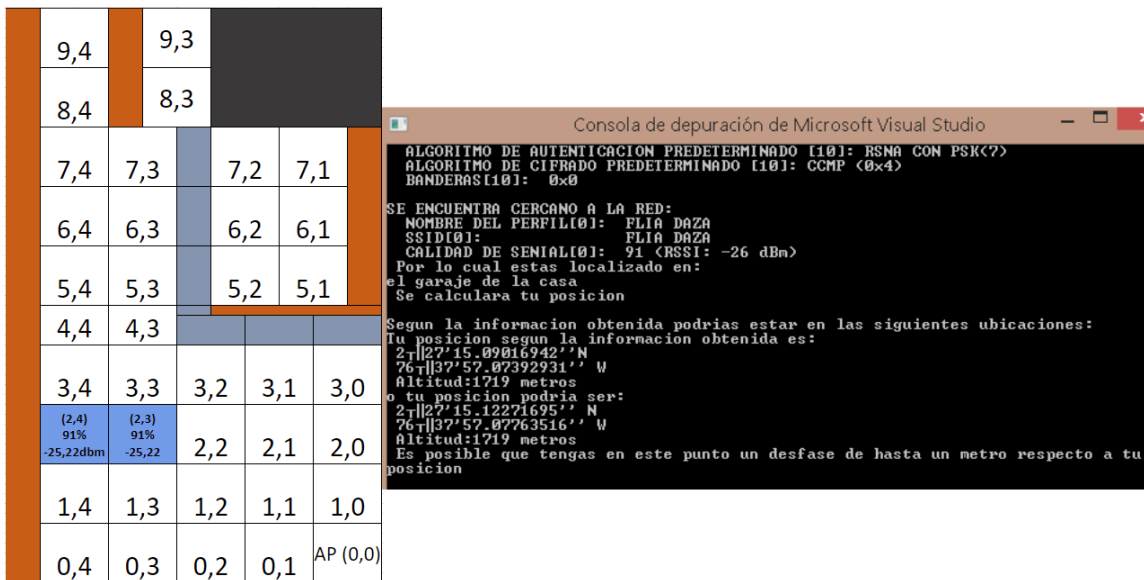


Figura 3-37 Posicionamiento en punto (2,4).

3.5.3 Pruebas con presencia de objetos

Para el área "Pasillo" se realiza otro tipo de prueba para evaluar el desempeño del sistema ante la presencia de objetos solidos diferentes a los presentes en el entorno de pruebas, además se varia la altura del dispositivo emisor de señal Wi-Fi como se muestra en la figura 3-38.



Figura 3-38 Nueva ubicación dispositivo emisor de señal Wi-Fi.

Seguido a esto se dispone a ubicar el dispositivo móvil en los límites del entorno y del área denominada "Pasillo" en el punto (9,4) como se muestra en la figura 3-39 cuyo valor de RSSI es de -35,66% y una intensidad de señal de 70%.

9,4		(9,4) 70% -35,66 dbm			
8,4		8,3			
7,4	7,3		7,2	7,1	
6,4	6,3		6,2	6,1	
5,4	5,3		5,2	5,1	
4,4	4,3				
3,4	3,3	3,2	3,1	3,0	
2,4	2,3	2,2	2,1	2,0	
1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	
0,4	0,3	0,2	0,1	AP (0,0)	

Figura 3-39 Dispositivo móvil en punto (9,3)

Como resultado de esta prueba se obtiene que el sistema arroja un porcentaje de intensidad de señal de 63% y un valor de RSSI de -41 dbm evidenciando información errónea para la posición del dispositivo móvil mostrando que se encuentra fuera de la edificación, sin embargo, la localización se visualiza de manera adecuada indicando que el dispositivo móvil se encuentra en el área "Pasillo" como se muestra en la figura 3-40.



```

Consola de depuración de Microsoft Visual Studio
NUMERO DE BSSIDs [6]: 1
CONECTABLE [6]: SI
NUMERO DE TIPOS DE PHY ADMITIDOS [6]: 1
CON UN PORCENTAJE DE SENIAL DE [0]: 56 <RSSI: -46 dBm>

SEGURIDAD HABILITADA [6]: SI
ALGORITMO DE AUTENTICACION PREDETERMINADO [6]: RSNA CON PSK<?>
ALGORITMO DE CIFRADO PREDETERMINADO [6]: CCMP <0x4>
BANDERAS [6]: 0x0

SE ENCUENTRA CERCANO A LA RED:
NOMBRE DEL PERFIL [0]: FLIA DAZA
SSID [0]: FLIA DAZA
CALIDAD DE SENIAL [0]: 63 <RSSI: -41 dBm>
Por lo cual estas localizado en:
estas en el pasillo de la casa Se calculara tu posicion
Estas fuera de la edificacion.

C:\Users\Sebastian\source\repos\PruebaLocal\Debug\PruebaLocal.exe <proceso 8296>
se cerró con el código 0.
Presione cualquier tecla para cerrar esta ventana. . .
    
```

Figura 3-40 Posicionamiento en punto (6,2) con variación en el entorno.

La siguiente prueba se realiza nuevamente en el área “sala” para ver la afectación de los cambios realizados esta vez el dispositivo móvil se ubica en el punto (3,1) el cual tiene una intensidad de señal de 97% y un valor de RSSI de -21,74 dbm como se muestra en la figura 3-41.

	9,4		9,3		
	8,4		8,3		
	7,4	7,3		7,2	7,1
	6,4	6,3		6,2	6,1
	5,4	5,3		5,2	5,1
	4,4	4,3			
	3,4	3,3	3,2	(3,1) 97% -21,74dbm	3,0
	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0
	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
	0,4	0,3	0,2	0,1	AP (0,0)

Figura 3-41 Dispositivo móvil en punto (3,1) en el área "Sala" con variación en el entorno.

Como resultado el sistema arroja un porcentaje de intensidad de señal de 93% y un valor de RSSI de -25dbm además de las coordenadas 2°27'15.09388235" N 76°37'57.04199228" W ALTITUD 1719 metros valores correspondientes al punto (1,3) del área “Garaje” teniendo entonces el sistema un funcionamiento erróneo como se muestra en la figura 3-42.



```

Consola de depuración de Microsoft Visual Studio
NUMERO DE TIPOS DE PHY ADMITIDOS [6]: 1
CON UN PORCENTAJE DE SENIAL DE [0]: 56 <RSSI: -46 dBm>

SEGURIDAD HABILITADA [6]: SI
ALGORITMO DE AUTENTICACION PREDETERMINADO [6]: RSNA CON PSK<?>
ALGORITMO DE CIFRADO PREDETERMINADO [6]: CCMP <0x4>
BANDERAS[6]: 0x0

SE ENCUENTRA CERCANO A LA RED:
NOMBRE DEL PERFIL[0]: FLIA DAZA
SSID[0]: FLIA DAZA
CALIDAD DE SENIAL[0]: 93 <RSSI: -25 dBm>
Por lo cual estas localizado en:
el garaje de la casa
Se calculara tu posicion

Tu posicion segun la informacion obtenida es:
21°12'15.09388235'' N
76°13'57.04199228'' W
Altitud:1719 metros

C:\Users\Sebastian\source\repos\PruebaLocal\Debug\PruebaLocal.exe <proceso 9088>
se cerró con el código 0.
Presione cualquier tecla para cerrar esta ventana. . .
    
```

Figura 3-42 Posicionamiento en punto (3,1) con variación en el entorno.

3.5.4 Evaluación de la precisión del sistema

Debido a que como se mencionó anteriormente en cada punto de la cuadrícula se tomaron 20 muestras en la fase Online del sistema se procede a hacer un análisis de la precisión del sistema, cabe aclarar que se toma la precisión como el valor de la desviación estándar en el error de ubicación. Como primera media se evalúa la precisión en cada área del entorno y posteriormente se evalúa la precisión total del sistema. Para la evaluación del sistema en esta área se maneja de dos maneras con presencia humana y sin presencia humana en el entorno la tabla 3 muestra los valores de la precisión en el área sala sin la presencia humana y tomando la distancia que hay desde el centro del punto (0,0) hasta el centro del punto de evaluación.

PUNTO	Distancia a AP (metros)	Desviación Estándar
(0,1)	1 m	0 m
(0,2)	2 m	1.53 m
(1,0)	1 m	0.366 m
(1,1)	1,41 m	0.366 m
(1,2)	2,34 m	1.39 m
(2,0)	2 m	0.71 m
(2,1)	2,34 m	1.05 m
(2,2)	2,81 m	0.81 m
(3,0)	3 m	1.74 m
(3,1)	3,16 m	1.74 m
(3,2)	3,60 m	1.41 m
Desviación promedio del área		1.043 m

Tabla 3: Desviación estándar en área "Sala".



La desviación estándar para esta área es de 1.043 metros donde el valor menor se presenta cuando el dispositivo móvil se encuentra en los puntos más cercanos al AP ((0,1), (1,1) y (1,0)) y los valores con mayor desviación estándar se presentan cuando el dispositivo móvil se encuentra en el punto más alejado al AP (3,2).

La tabla 4 muestra los valores de la precisión en el área “Garaje” sin la presencia humana y tomando la distancia que hay desde el centro del punto (0,0) hasta el centro del punto de evaluación.

PUNTO	Distancia a AP (metros)	Desviación Estándar
(0,3)	3 m	0.64 m
(0,4)	4 m	0.50 m
(1,3)	3,16 m	0.99 m
(1,4)	4,12 m	0.64 m
(2,3)	3,60 m	1.51 m
(2,4)	4.47 m	1.41 m
(3,3)	4.24 m	1.32 m
(3,4)	5 m	1.72 m
Desviación promedio del área		1,091 m

Tabla 4: Desviación estándar en área “Garaje”.

La desviación estándar para esta área es de 1.091 metros donde el valor menor se presenta cuando el dispositivo móvil tiene LoS con el AP ((0,3) y (0,4)) y los valores con mayor desviación estándar se presentan cuando el dispositivo móvil se encuentra en el punto más alejado al AP (3,4). Seguido a esto se procede a evaluar la desviación en el área “Comedor” los valores son presentados en la tabla 5.

PUNTO	Distancia a AP (metros)	Desviación Estándar
(4,3)	5 m	0.45 m
(4,4)	5,65 m	0.59 m
(5,3)	5,83 m	0.89 m
(5,4)	6,40 m	0.74 m
(6,3)	6,70 m	1.31 m
(6,4)	7,21 m	1.26 m
(7,3)	7,61 m	1.28 m



(7,4)	8,06 m	1.9 m
Desviación promedio del área		1,052 m

Tabla 5: Desviación estándar en área “Comedor”.

Para el área “Comedor” se tiene una desviación estándar de 1.052 m teniendo un comportamiento similar a las áreas antes estudiadas donde el punto más cercano al AP en este caso es (4,3) presenta un menor valor que el punto más alejado (7,4).

Los resultados para la desviación de las áreas “Cocina” puntos (9,3), (9,4) y “Pasillo” puntos (8,3), (8,4) se muestran en la tabla 6. Siendo estas las áreas más alejadas del sistema presentan una desviación estándar más elevada a diferencia de las áreas antes estudiadas.

PUNTO	Distancia a AP (metros)	Desviación Estándar
(8,3)	8,54 m	1.41 m
(8,4)	8,95 m	1.35 m
Desviación promedio del área		1.38 m
(9,3)	9,48 m	1.22 m
(9,4)	10.81 m	1.26 m
Desviación promedio del área		1.24 m

Tabla 6: Desviación estándar en área “Cocina” y “Pasillo”.

Los resultados para el área “Cuarto” se muestran en la tabla 7, donde se tiene una mayor desviación estándar que en las áreas “Comedor”, “Garaje” y “Sala”.

PUNTO	Distancia a AP (metros)	Desviación Estándar
(5,1)	5,01 m	1.22 m
(5,2)	5,38 m	1.16 m
(6,1)	6,08 m	1.27 m
(6,2)	6,32 m	1.28 m
(7,1)	7,07 m	1.29 m
(7,2)	7,28 m	1.21 m
Desviación promedio del área		1,255 m

Tabla 7: Desviación estándar en área “Cuarto”.



Una vez se tiene la desviación estándar en todas las áreas del entorno se procede a realizar el promedio de estas para así tener un valor de la precisión del sistema, el cálculo de esta se muestra en la tabla 8.

AREA	DESVIACION PROMEDIO
Sala	1.043 m
Garaje	1.091 m
Comedor	1.052 m
Cuarto	1.255 m
Cocina	1.24 m
Pasillo	1.38 m
Desviación estándar promedio	1.176 m

Tabla 8: Desviación estándar del sistema.





CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

4.1 Conclusiones.

- ✓ Es importante determinar la técnica y la métrica adecuadas para los dispositivos de la tecnología seleccionada, como para cumplir los requisitos del sistema seleccionados a la hora del diseño.
- ✓ Para la selección de la tecnología se tuvieron en cuenta aspectos importantes como el costo de implementación del sistema
- ✓ El estudio realizado a la arquitectura Native 802.11 demostró que esta proporciona al sistema operativo Windows un marco de trabajo para el desarrollo de servicios relacionados con las redes Wi-Fi suministrando una API pública o también llamada API Native Wi-Fi.
- ✓ RSSI es la métrica más adecuada para trabajar en un sistema de posicionamiento debido a su baja complejidad de procesamiento y la no necesidad de sincronización con el sistema.
- ✓ El trabajo conjunto de dos o más técnicas de posicionamiento incrementa el rendimiento de los sistemas de posicionamiento en interiores puesto que al combinarlas se mitigan algunas de las falencias que se tienen al trabajar con una sola técnica de posicionamiento.
- ✓ Se puede trabajar con una o más métricas de posicionamiento sin embargo esto incrementa la complejidad de procesamiento de los datos del sistema puesto que aumenta el uso de algoritmos geométricos o algebraicos que son necesarios para implementar algunas de estas métricas.
- ✓ Al trabajar con un solo dispositivo emisor de señal Wi-Fi, al realizar el promedio ponderado en la construcción de *fingerprinting* se obtienen puntos de referencia con igual valor de RSSI afectando así el desempeño del sistema puesto que se evidencia en las pruebas hay desfases hasta de 1m en la posición objetivo.
- ✓ Fingerprinting de señal es adecuado para la localización debido a que este proporciona la información necesaria y suficiente para interactuar con la API NATIVA W-Fi de Windows.



4.2 Recomendaciones.

Tras el trabajo realizado, hay ciertos aspectos que podrían resultar útiles cuando se realiza un trabajo de grado similar al presente; desde aquí se propone:

- ✓ Definir de manera clara los pasos que conforman la metodología de análisis e implementación. De esta manera al realizar cada uno de estos de forma correcta, seguramente se obtendrán los resultados que se esperan.
- ✓ Trabajar con la API Native Wi-Fi de Windows se debe tener en cuenta que esta API está disponible solo hasta la versión 8 de este sistema operativo de ahí en adelante se trabaja con Wi-Fi Direct, igualmente se debe estudiar más a fondo sobre las cualidades de esta API.
- ✓ Para la implementación de un sistema de posicionamiento en interiores empleando Wi-Fi y considerando los resultados obtenidos, se debe analizar la implementación y adecuación de una segunda *fingerprinting* de señal para mitigar los efectos que se generan al tener una duplicidad en las celdas de esta misma. Ocasionando así problemas en la exactitud y la precisión del sistema.

4.3 Trabajos futuros.

Se proponen los siguientes trabajos futuros, entre otros:

- ✓ Propuesta de un sistema de posicionamiento en interiores empleando Wi-Fi con la implementación de 2 *fingerprinting* de señal buscando un aumento en la precisión del sistema.
- ✓ Implementar un sistema de posicionamiento en interiores empleando Wi-Fi donde se realice una interfaz gráfica que muestre la posición del objetivo móvil dentro del entorno.
- ✓ Análisis comparativo del desempeño de un sistema de posicionamiento en interiores empleando Wi-Fi con triangulación en sus dos enfoques.
- ✓ Impacto en la exactitud y la precisión de los sistemas de posicionamiento en interiores empleando diferentes tecnologías.
- ✓ Diseñar e implementar un sistema de posicionamiento empleando Wi-Fi utilizando dos técnicas para obtener una precisión menor a 1.176m.



- ✓ Implementación de un modelo matemático o predictivo para la alimentación de la base de datos en la fase offline del sistema.



REFERENCIAS

- [1] Mai A. Al-Ammar, Suheer Alhadhrami, AbdulMalik Al-Salamn, Abdulrahman Alarifi, Hend S. Al-Khalifa, Ahmad Alnafessah y Mansour Alsaleh, Comparative Survey of Indoor Positioning Technologies, Techniques and Algorithms, Computer Science Department, King Saud University, Riyadh, KSA, Computer Research Institute, King Abdulaziz City for Science and Technology, Riyadh, KSA, Department of Computer Science, Al-Imam Mohammad bin Islamic University, Riyadh, KSA, 2014
- [2] Y. W. Xu Yang, Yutian Zhao, Y. L. Laurie Cuthbert, Bluetooth Positioning using RSSI and Triangulation Methods, MPI-QMUL Information Systems Research Centre Macao Polytechnic Institute, International School Beijing University of Post and Telecommunications, School of Electronic Engineering and Computer Science Queen Mary University of London, Macao, Beijing, London, 2013.
- [3] Y. G. Anthony Lo, A Survey if Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks, IEEE communications surveys & tutorials, Vol 11, 2009
- [4] Hui Liu, Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems, IEEE transactions on systems, man and cybernetics-part C: Applications and reviews, Vol 37, 2007
- [5] J. A. Seseña Osorio, Simulador para posicionamiento inalámbrico en interiores, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, 2009
- [6] Quoc Duy Vo, A Survey of Fingerprint based Outdoor Localization, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015.
- [7] S. Papaioannou, H. Wen, A. Markham, and N. Trigoni, "Fusion of radio and camera sensor data for accurate indoor positioning," in Proc. IEEE MASS, Oct 2014, pp. 109–117.
- [8] Suining He, Wi-Fi Fingerprint-based Indoor Positioning: Recent Advances and Comparisons, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015
- [9] L. Hung-Huan, Chun Liu, Implementation of Wi-Fi Signal Sampling on an-Android Smartphone for Indoor Positioning Systems, Department of Electronic Engineering, Chung Yuan Christian University, Taiwan, 2017.
- [10] Object Detection Using YOLO v2 Deep Learning. MathLab, <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ug/object-detection-using-yolo-v2.html>
- [11] Sistema de Posicionamiento Global Al Servicio del Mundo, GPS, <https://www.gps.gov/multimedia/images/>
- [12] M. Villalba Capilla, Sistema de Posicionamiento en Interiores, Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2017.
- [13] H. A. Yanco, "Wheelesley: A robotic wheelchair system: Indoor navigation and user interface" in Assistive Technology and Artificial Intelligence, ser.



- Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 1998, vol. 1458, pp. 256–268.
- [14] Chouchang Yang, Shao Huai-Rong, WiFi-Based Indoor Positioning, IEEE Communications Magazine, 2015.
- [15] A. G. Araujo Brett, Escaneo de Redes IEEE 802.11: Un enfoque práctico para la Internet del Futuro, Universidad de los Andes, Mérida, 2016.
- [16] P. M. Jornet, Diseño y desarrollo de una aplicación Android para calibrar un sistema de localización de interiores, Universidad Politécnica de Cartagena, España, 2017.
- [17] Chenshu Wu, Yunhao Liu, WILL: Wireless Indoor Localization without Site Survey, IEEE Transactions On Parallel and Distributed Systems, Vol 24, No 4, 2013.
- [18] R. Mautz, Indoor Positioning Technologies, Institute of Geodesy and Photogrametry Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, Zurich 2012
- [19] Mathieu Bouet, A. L. dos Santos, RFID Tags: Positioning Principles and Localization Techniques, Laboratoire d'Informatique de Paris 6, Université Pierre et Marie Curie, Paris, Department of Informatics Federal University of Paraná, Paraná, 2008
- [20] J. Collin, O. Mezentsev, G. Lachapelle, et al. Indoor positioning system using accelerometry and high accuracy heading sensors. In Proc. of ION GPS/GNSS 2003 Conference, pages 9–12, 2003
- [21] Y. Gu, A. Lo, and I. Niemegeers. A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 11(1):13–32, 2009.
- [22] K. Al Nuaimi and H. Kamel. A survey of indoor positioning systems and algorithms. In Innovations in Information Technology (IIT), 2011 International Conference on, pages 185–190. IEEE, 2011.
- [23] J. Ch'oliz, M. Eguizabal, A. Hernandez-Solana, and A. Valdovinos. Comparison of algorithms for uwb indoor location and tracking systems. In Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd, pages 1–5. IEEE, 2011.
- [24] R. Mautz. Indoor positioning technologies. PhD thesis, Habil. ETH Z'urich, 2012, 2012.
- [25] R Bill, C Cap, M Kofahi and T Mundt, Indoor and Outdoor Positioning in Mobile Environments-a Review and some Investigations on WLAN-Positioning, University Rostock, Alemania, 2009
- [26] Native Wi-Fi, Microsoft Windows, <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/win32/nativewifi/portal>
- [27] K. Pahlavan, X. Li y J.P. M' Akel' A, Indoor Geolocation Science and Technology, IEEE Communication Magazine, vol. 40, pp. 112-118, Feb. 2002.
- [28] S. Fernández Arcones, Posicionamiento 2D5 en interiores mediante comunicaciones inalámbricas RF, Universidad de Alcalá, 2012.



[29] WlanEnumInterfaces function (wlanapi.h), Microsoft Windows, <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/win32/api/wlanapi/nf-wlanapi-wlanenuminterfaces>.



APÉNDICE 1

Configuración dispositivo Hardware

Paso 1)

Para la configuración del dispositivo Technicolor TC8503RC se procede a ingresar a la interfaz de configuración que este trae por defecto, esto se logra ingresando en cualquier navegador la dirección que trae por defecto de la puerta de enlace esta se puede encontrar fácilmente ingresando el comando ipconfig/all en la consola de comandos de Windows, una vez se ingresa este comando la dirección IP aparece como se muestra en la figura 1.

```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
Estado de los medios. . . . . : medios desconectados
Sufijo DNS específico para la conexión. . . :
Descripción . . . . . : Microsoft Wi-Fi Direct Virtual Adapter #4
Dirección física. . . . . : F2-77-C3-DB-5E-BB
DHCP habilitado . . . . . : no
Configuración automática habilitada . . . : sí

Adaptador de LAN inalámbrica Wi-Fi:

Sufijo DNS específico para la conexión. . . : mshome.net
Descripción . . . . . : Intel(R) Wi-Fi 6 AX201 160MHz
Dirección física. . . . . : F0-77-C3-DB-5E-BB
DHCP habilitado . . . . . : sí
Configuración automática habilitada . . . : sí
Vínculo: dirección IPv6 local. . . : fe80::7111:c254:4c29:1493%16(Preferido)
Dirección IPv4. . . . . : 192.168.137.212(Preferido)
Máscara de subred . . . . . : 255.255.255.0
Concesión obtenida. . . . . : jueves, 10 de febrero de 2022 2:02:24 p. m.
La concesión expira . . . . . : viernes, 4 de marzo de 2022 8:35:52 a. m.
Puerta de enlace predeterminada . . . . . : 192.168.137.1
Servidor DHCP . . . . . : 192.168.137.1
IAID DHCPv6 . . . . . : 267417539
DUID de cliente DHCPv6. . . . . : 00-01-00-01-28-4A-EA-88-30-D0-42-E1-21-49
Servidores DNS. . . . . : 192.168.137.1
NetBIOS sobre TCP/IP. . . . . : habilitado
```

Figura 1 Dirección puerta de enlace.

Paso2)

Una vez se tiene la dirección de la puerta de enlace se procede a ingresar está en el navegador la cual nos redirecciona a la interfaz del dispositivo, seguido a esto se procede a ingresar las credenciales para poder ingresar a las configuraciones del dispositivo generalmente dichas credenciales son “Username = admin” y “Password = admin” dicha interfaz de ingreso se muestra en la figura 2.

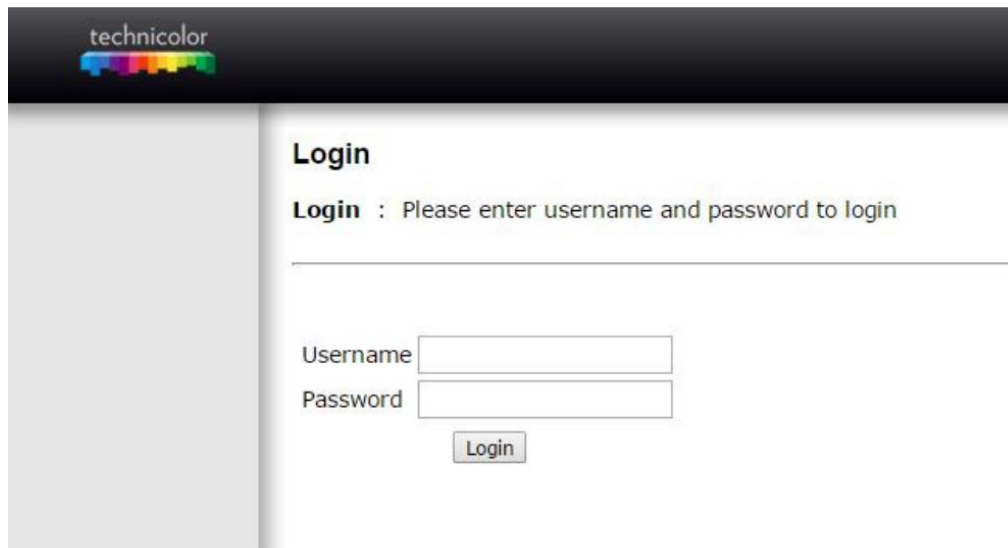


Figura 2 Interfaz ingreso al dispositivo.

Paso 3)

Estando dentro de las configuraciones del dispositivo en la pestaña “Primary Network” se puede configurar tanto el SSID que viene por defecto como el tipo de seguridad que se le quiere dar a la red, como el Username y el Password de ingreso al dispositivo así mismo la contraseña de ingreso a la red como se muestra en la figura 3 y el canal por el cual transmitirá el dispositivo, para este caso la selección del canal se deja aleatoria para así evitar interferencia co-canal con otras redes presentes dentro del entorno.

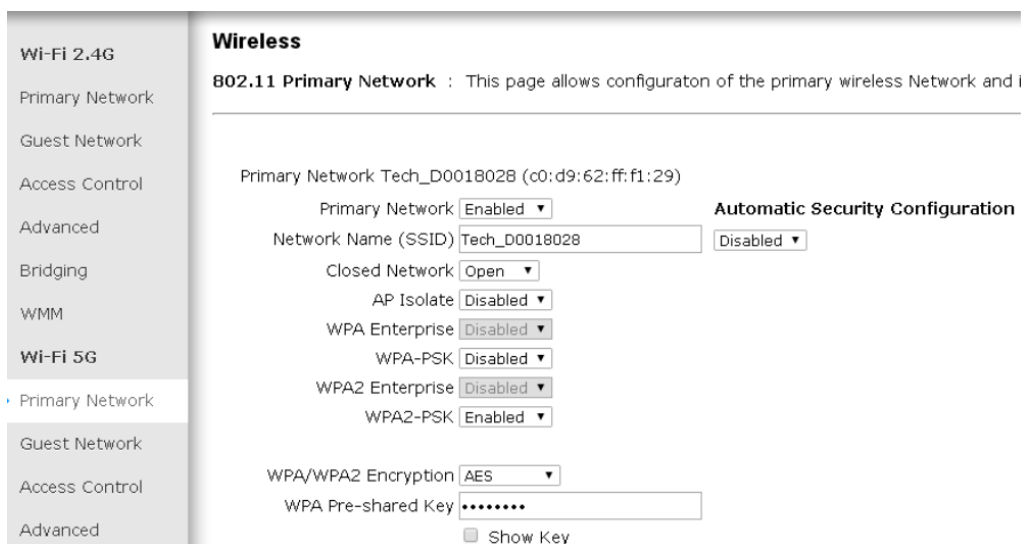


Figura 3 Interfaz configuración del dispositivo.



Configuración software:

Una vez se tiene configurado el dispositivo emisor de señal se procede a configurar el software que será utilizado en el sistema que como se mencionó anteriormente será Visual Studio Community 2019

Paso 1)

Se ingresa a la página oficial de Visual Studio y descargamos la versión 2019 la cual nos descarga un ejecutable con extensión .exe una vez se encuentre descargado se ejecuta el archivo mostrándonos la interfaz que se muestra en la figura 4 en la cual se selecciona **Desarrollo para el escritorio en C++** y se presiona el botón instalar.

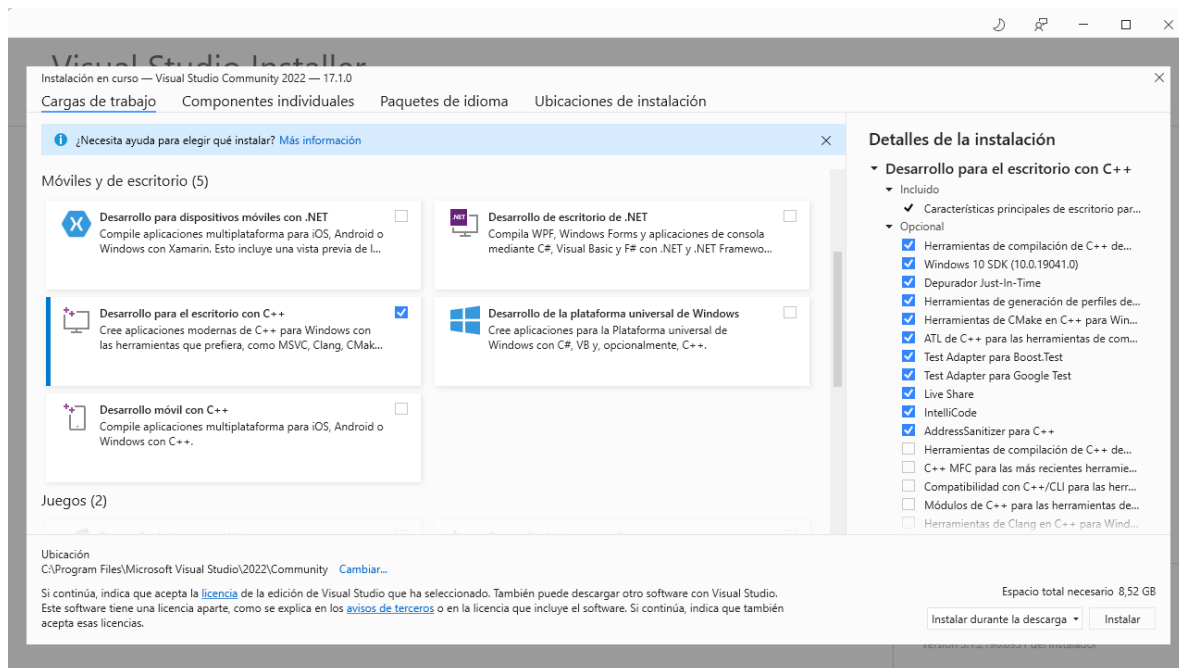


Figura 4 Interfaz primaria visual studio code.

Una vez instalado el programa automáticamente se abre la interfaz del software en la cual se selecciona la opción crear un proyecto nuevo la cual nos despliega las opciones mostradas en la figura 5.

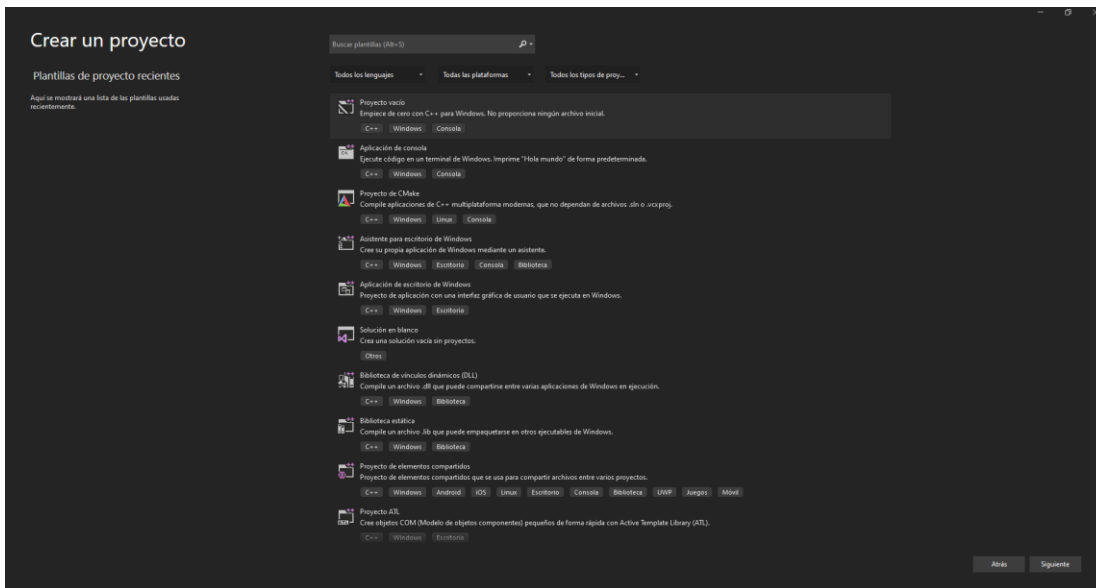


Figura 5 Interfaz crear nuevo proyecto en Visual Studio

Una vez se está en esta interfaz se selección la opción aplicación de escritorio de Windows, se procede a darle un nombre al nuevo proyecto, se configura la ubicación de este si así se desea y finalmente podemos modificar el nombre de la solución que se va a crear una vez configurado esto el software automáticamente nos crea un nuevo proyecto con las configuraciones predeterminadas de una aplicación para escritorio de windows con la cual ya se procede a trabajar en el sistema como se muestra en la figura 6.

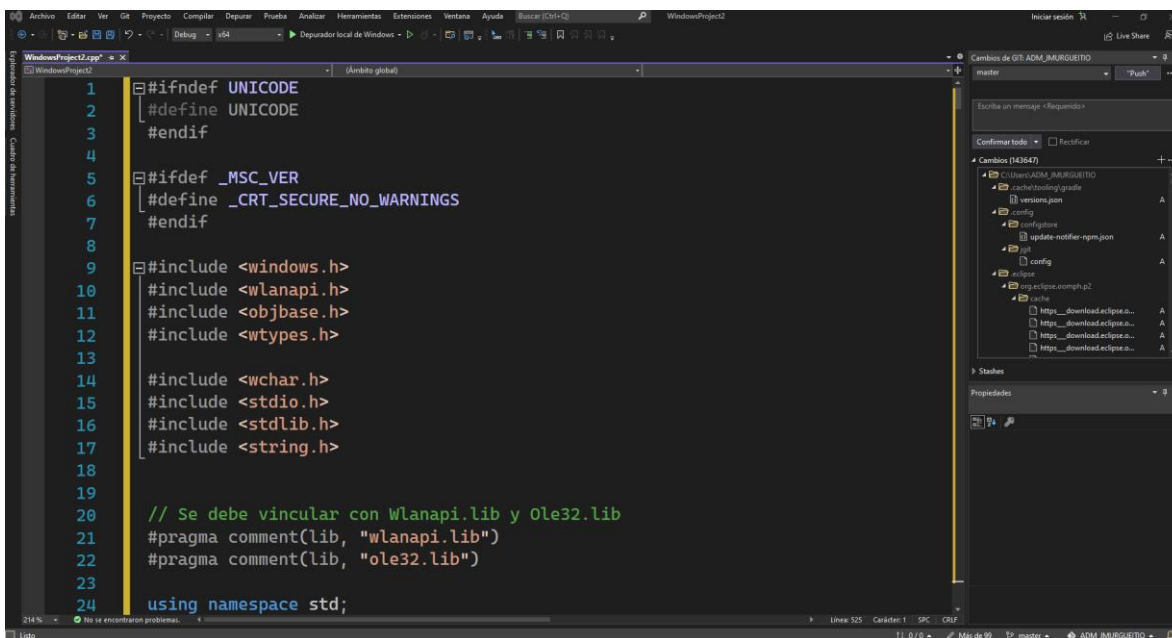


Figura 6 Proyecto listo para realizar el sistema de posicionamiento en interiores



Escaneo de redes y toma de datos Wi-Fi.

Como se mencionó con anterioridad al seleccionar Wi-Fi como la tecnología para el sistema de posicionamiento en interiores, se hace uso de la API Nativa que Windows proporciona para realizar diferentes acciones con las redes. Esta API emplea el lenguaje C++, el cual se desarrolla en el entorno de programación *Visual Studio Community*. Para este caso, la API será la encargada de mostrar las interfaces de red disponibles en el dispositivo, realizar el escaneo de las redes Wi-Fi que se encuentren disponibles en el entorno, además de la extracción del valor del RSSI que contiene la trama Wi-Fi, esto es posible gracias a las funciones de la API las cuales se presentarán más adelante.

La primera función en usarse es *WlanEnumInterfaces*, la cual enumera las interfaces LAN habilitadas actualmente en el dispositivo móvil, en este caso el computador portátil. La sintaxis de la función se muestra a continuación en la figura 1. La función *WlanEnumInterfaces* hace una asignación de memoria para la lista de interfaces devueltas en el parámetro *ppInterfaceList* si la función tiene éxito. La memoria utilizada por el parámetro *ppInterfaceList* debe liberarse llamando a la función *WlanFreeMemory* [34].

```
C++  
  
DWORD WlanEnumInterfaces(  
    HANDLE                hClientHandle,  
    PVOID                 pReserved,  
    PWLAN_INTERFACE_INFO_LIST *ppInterfaceList  
);
```

Figura 1 Sintaxis función *WlanEnumInterfaces*, tomada de [34]

WlanEnumInterfaces tiene como parámetros:

- *hClientHandle*, este es el identificador de sesión.
- *pReserved* este es un parámetro que está reservado para uso futuro por lo cual se debe establecer como nulo "NULL".
- *ppInterfaceList* el cual es un puntero para recibir devuelta la lista de interfaces LAN inalámbricas y la almacena en *WLAN_INTERFACE_INFO_LIST*.

Si se tiene éxito la función retorna el valor "ERROR_SUCCESS", si por el contrario la función no pudo ejecutarse con normalidad retorna los códigos descritos en la tabla 1:



Código de retorno	Descripción del código
ERROR_INVALID_PARAMETER	Un parámetro es incorrecto. Si hClient o ppInterfaceList tienen un valor NULL. Si hClientHandle no es válido.
ERROR_INVALID_HANDLE	Sucede cuando el identificador hClientHandle no es encontrado en la tabla de identificadores.
RPC_STATUS	Varios códigos de error.
ERROR_NOT_ENOUGH_MEMORY	No hay suficiente memoria disponible para procesar esta solicitud y asignar memoria para los resultados de la consulta.

Tabla 1: Códigos de retorno función "WlanEnuInterfaces"

Posteriormente se llama a la función *WlanScan* la cual es la encargada de realizar el escaneo de las redes para la interfaz inalámbrica del dispositivo móvil. La sintaxis de esta función se muestra en la figura 2.

```
C++  
  
DWORD WlanScan(  
    HANDLE          hClientHandle,  
    const GUID      *pInterfaceGuid,  
    const PDOT11_SSID pDot11Ssid,  
    const PWLAN_RAW_DATA pIeData,  
    PVOID           pReserved  
);
```

Figura 2 Sintaxis función WlanScan, tomada de [34]

Los parámetros que contiene esta función son:

- **hClientHandle [entrada]:** el cual al igual que con la anterior función es el identificador de sesión.
- **pInterfaceGuid [entrada]:** se usa para indicar el identificador único global (GUID, *Globally Unique Identifier*) de la interfaz de red con que se va a trabajar.
- **pDot11Ssid [entrada]:** es un parámetro opcional el cual es un puntero a una estructura de tipo DOT11_SSID la cual es la encargada de especificar el SSID



de la red a escanear. Si ese parámetro se establece como “NULL” se devuelve una lista con todas las redes disponibles.

- **pData [entrada]:** es un puntero a un elemento de información que se puede incluir a las solicitudes de escaneo. Apunta a una estructura WLAN_RAW_DATA la cual puede incluir información de disponibilidad de aprovisionamiento del cliente y requisitos de autenticación 802.1X.
- **pReserved [entrada]:** está reservado para utilización futura, el cual debe establecerse como “NULL”.

La función WlanScan realiza una solicitud al controlador nativo de LAN inalámbrica 802.11 para realizar la búsqueda de redes inalámbricas disponibles. Este controlador puede o no enviar solicitudes de escaneo (una exploración activa) esto depende de la implementación y los valores que se le entreguen a pDot11Ssid y pData. Al realizar el llamado a la función WlanScan puede que se elimine la lista actual de redes inalámbricas que están disponibles antes de iniciar el escaneo.

Si la llamada de esta función tiene éxito el valor que se retorna es “ERROR_SUCCESS”, si la función falla puede retornar los códigos mostrados en la tabla 2:

Código de retorno	Descripción del código
ERROR_INVALID_PARAMETER	Se retorna este código si algún parámetro es incorrecto, bien sea porque hClientHandle o pInterfaceGuid tienen valor “NULL” o bien sea porque pReserved no tiene el valor “NULL”. Otra razón puede ser que el valor de hClientHandle no es válido.
ERROR_INVALID_HANDLE	Sucede cuando el identificador hClientHandle no es encontrado en la tabla de identificadores.
RPC_STATUS	Varios códigos de error.
ERROR_NOT_ENOUGH_MEMORY	No hay suficiente memoria disponible para procesar esta solicitud y asignar memoria para los resultados de la consulta.

Tabla 2: Códigos de retorno función “WlanScan”

Seguido de esto se usa la función WlanGetAvaibleNetworkList la cual es la encargada de recuperar y mostrar las redes disponibles en la interfaz de red inalámbrica del dispositivo móvil junto con los datos que se requiera obtener de las redes. La sintaxis de esta función se muestra en la figura 3.



```
C++  
  
DWORD WlanGetAvailableNetworkList(  
    HANDLE                hClientHandle,  
    const GUID            *pInterfaceGuid,  
    DWORD                 dwFlags,  
    PVOID                 pReserved,  
    PWLAN_AVAILABLE_NETWORK_LIST *ppAvailableNetworkList  
);
```

Figura 3 Sintaxis función WlanGetAvaibleNetworkList, tomada de [24]

Para que esta función se ejecute se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- **hClientHandle:** como se ha mencionado anteriormente es el identificador de sesión.
- **pInterfaceGuid:** se usa para indicar el GUID de la interfaz de red con que se va a trabajar.
- **dwFlags:** Un conjunto de banderas que controlan el tipo de redes devueltas en la lista. Este valor se pone en “0”.
- **pReserved:** está reservado para utilización futura, el cual debe establecerse como “NULL”.
- **ppAvaibleNetworkList:** este parámetro es el encargado de retornar la lista de redes solicitada junto con los BSS.

La función *WlanGetAvailableNetworkList* asigna memoria para la lista de redes disponibles devueltas en el parámetro *ppAvailableNetworkList* cuando la función tiene éxito. La memoria utilizada en el parámetro *ppAvailableNetworkList* debe liberarse llamando a la función *WlanFreeMemory* después de ya no sea necesaria.

Si la función tiene éxito el valor que se retorna es “*ERROR_SUCCESS*”, de lo contrario puede retornar los códigos mostrados en la tabla 3:

Código de retorno.	Descripción del código
--------------------	------------------------



ERROR_INVALID_PARAMETER	Se retorna este código si algún parámetro es incorrecto, bien sea porque hClientHandle, pInterfaceGuid o ppAvaibleNetworkList tienen valor "NULL" o bien sea porque pReserved no tiene el valor "NULL". Otra razón puede ser que el valor de dwFlags o de hClientHandle no es válido.
ERROR_INVALID_HANDLE	Sucede cuando el identificador hClientHandle no es encontrado en la tabla de identificadores.
ERROR_NDIS_DOT11_POWER_STATE_INVALID	La interfaz de red inalámbrica se encuentra apagada, por lo tanto, no hay redes disponibles.
RPC_STATUS	Varios códigos de error.
ERROR_NOT_ENOUGH_MEMORY	No hay suficiente memoria disponible para procesar esta solicitud y asignar memoria para los resultados de la consulta.

Tabla 3: Códigos de retorno función "WlanGetAvailableNetworkList"



APÉNDICE 2

Escaneo de redes Wi-Fi

En este caso se ha seleccionado el sistema operativo Windows 8 con el cual mediante la API NATIVA Wi-Fi proporcionada por Windows se puede realizar un escaneo de redes, además de la obtención del valor RSSI de las diferentes redes escaneadas.

Para esto se debe hacer un estudio de la arquitectura Native 802.11 la cual se muestra en la figura 1, dicha arquitectura está disponible desde la versión Vista hasta la versión Windows 8 a partir de esta versión aparece la tecnología Wi-Fi direct. Esta arquitectura aporta la funcionalidad y la interfaz de comunicaciones que deben seguir los drivers y servicios desarrollados.

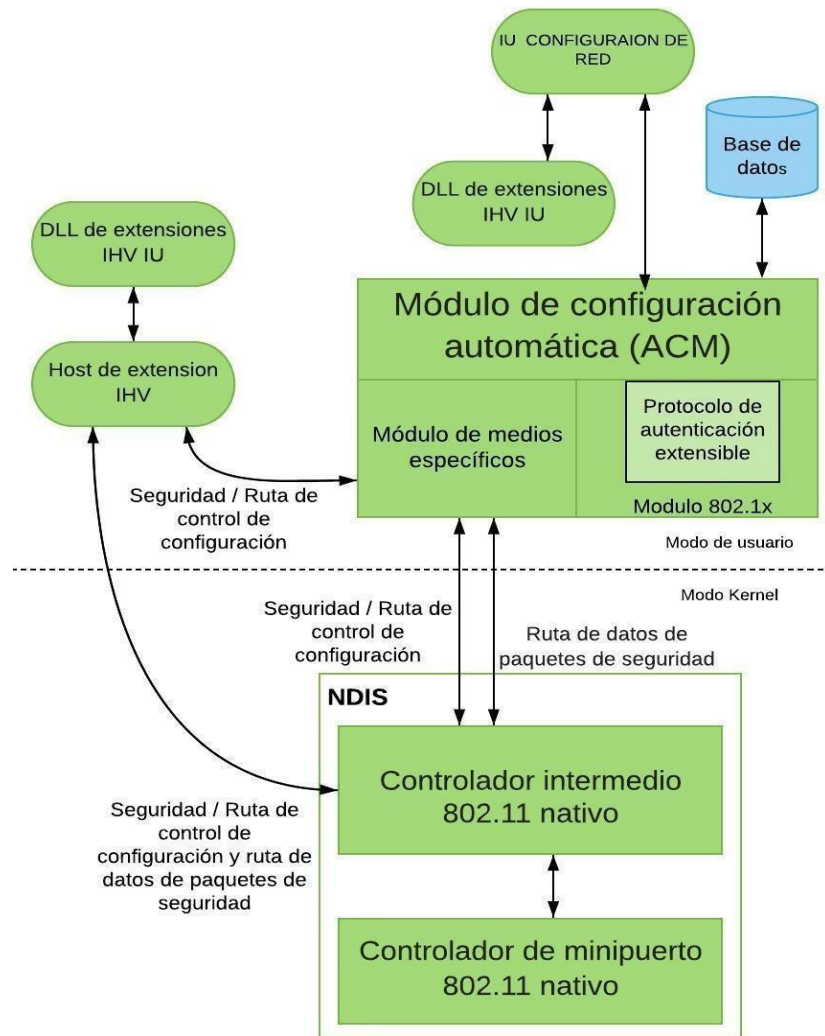


Figura 1 Arquitectura Native 802.11, tomada de [26]



El modo Kernel está conformado por los drivers de la Especificación de interfaz de controlador de red (NDIS, *Network Driver Interface Specification*), o controladores software del dispositivo 802.11. Los cuales son una especificación de la funcionalidad que debe implementar un driver dependiendo de la tipología. Además de esto cada versión de NDIS especifica un conjunto de funcionalidades. Dichas funcionalidades se definen mediante un objeto identificador (OID, *identifier object*), lo que quiere decir que si un controlador quiere ser compatible con una especificación NDIS debe implementar los OID que establezca esa especificación.

La arquitectura 802.11 en su modo Kernel está compuesta por dos tipos de controladores:

- Controlador intermedio 802.11 nativo (IM, *Intermediate controller*): Es el punto de entrada al modo de usuario de la arquitectura. El cuál es el encargado de recoger las peticiones del módulo de medios especificados y las redirecciona al controlador del minipuerto.
- Controlador de minipuerto 802.11 nativo: Este controlador es desarrollado por el fabricante del dispositivo el cual se encarga de proporcionar el acceso a las interfaces inalámbricas 802.11. Se debe recordar que el uso de los OIDS es indispensable para que el controlador sea compatible con la arquitectura.

En el modo de usuario de la arquitectura los módulos que hacen parte de este son los encargados de gestionar la funcionalidad 802.11 realizando el envío de los OID que son necesarios para el funcionamiento de las capas más bajas de la arquitectura. Los dos módulos que se destacan son:

- Módulo de configuración automática (ACM, *Application Configuration Management*): Este es el módulo principal del modo usuario, puesto que es el encargado de gestionar el acceso a las redes Wi-Fi, al igual realiza la gestión de los perfiles de red. Además, es el encargado de brindar una API pública de desarrollo, con la cual se pueden realizar las siguientes funcionalidades [26]:
 - Procesamiento de los eventos que genera la tarjeta red (NIC, *Network Interface Card*).
 - Enumeración de las diferentes interfaces Wi-Fi disponibles.
 - Consulta de las capacidades y estado de las interfaces.
 - Escaneo de las distintas redes Wi-Fi accesibles.
 - Conexión y desconexión a una red Wi-Fi.
 - Creación, modificación y validación a una red Wi-Fi.
 - Recepción de notificaciones.



- Módulo de medios específicos (MSM, *specific media module*): Es el módulo encargado de recibir las peticiones del módulo ACM por medio de una API privada la cual proporciona entre otros los siguientes servicios [26]:
 - Puede emitir solicitudes al controlador IM para descubrir redes Wi-Fi, así mismo realiza solicitudes para conexión o desconexión de una red.

Emite solicitudes al controlador IM para consultar o configurar los parámetros de conectividad, seguridad y configuración del controlador de minipuerto.



APÉNDICE 3

Para realizar la elección de la ubicación del AP se tuvo en cuenta la cobertura y el multitrayecto, por lo cual se decide ubicarlo en el punto (0,0) donde se obtuvieron una mayor homogeneidad en los niveles de la señal.

Fingerprinting del entorno

En la figura 1 se muestran los valores del promedio ponderado de las intensidades de señal tomadas en la fase offline del sistema de posicionamiento en interiores, los valores ahí mostrados están en unidades de dbm.

-35,08		-35,66		
-31,6		-33,34		
-31,02	-30,44	-32,18	-29,28	
-28,12	-29,28	-28,7	-30,44	
-26,96	-26,96	-29,86	-27,54	
-26,38	-26,38			
-25,8	-25,8	-22,32	-21,74	-21,74
-25,22	-25,22	-22,32	-21,16	-20,58
-24,64	-24,06	-22,9	-20	-20
-24,64	-23,48	-22,9	-20	AP (0,0)

Figura 1 Fingerprinting de intensidades de señal

En la figura 2 se muestra la división del entorno según los puntos de referencia establecidos, para así proceder a asignarle una coordenada con respecto a la coordenada que se tiene del dispositivo emisor de señal Wi-Fi.

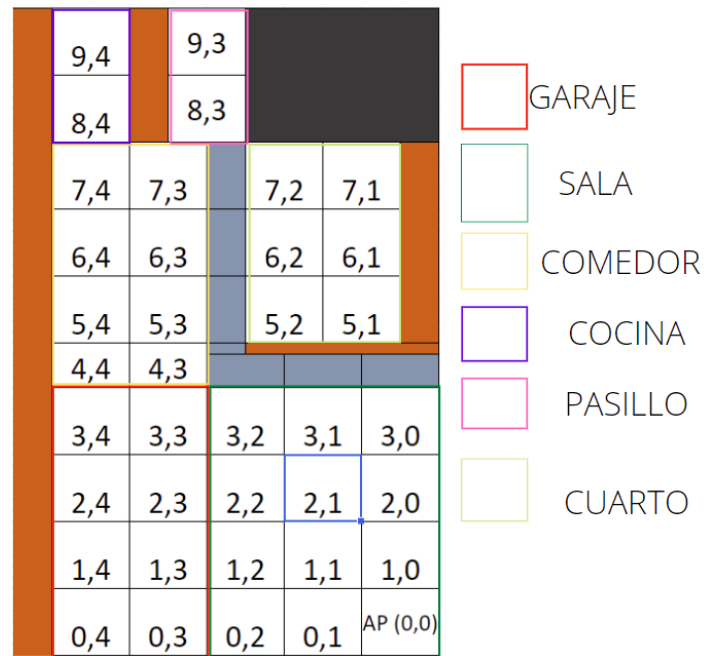


Figura 2 División del entorno

Seguido a esto mediante la herramienta de ingeniería civil "TOPO3" disponible en la web se realiza la conversión de cada punto de referencia en coordenadas geográficas como se muestra en la figura 2 para posteriormente sean almacenadas en la base de datos del sistema.



Propuesta de un sistema de posicionamiento para interiores empleando Wi-Fi

2°27'15.8127722"N 76°37'57.38272625"W Altitud:1719 metros		2°27'15.81277245"N 76°37'57.3827262"W Altitud:1719 metros			
2°27'15.75139006"N 76°37'57.34337699"W Altitud:1719 metros		2°27'15.71884253"N 76°37'57.33967087"W Altitud:1719 metros			
2°27'15.62491285" N 76°37'57.29661561" W Altitud:1719 metros	2°27'15.4658881123" N 76°37'57.24614846"W Altitud:1719 metros	2°27'15.59236532" N 76°37'57.29290955"W Altitud:1719 metros	2°27'15.465888112" N 76°37'57.24614844" W Altitud:1719 metros		
2°27'15.49843565" N 76°37'57.24985444" W Altitud:1719 metros	2°27'15.46588811" N 76°37'57.24614844"W Altitud:1719 metros	2°27'15.43334057" N 76°37'57.24244245" W Altitud:1719 metros	2°27'15.40079304"N 76°37'57.23873647"W Altitud:1719 metros		
2°27'15.30686336" N 76°37'57.19568159" W Altitud:1719 metros	2°27'15.3394109" N 76°37'57.19938753" W Altitud:1719 metros	2°27'15.27431583" N 76°37'57.19197567" W Altitud:1719 metros	2°27'15.24176829" N 76°37'57.18826976" W Altitud:1719 metros		
2°27'15.21293369" N 76°37'57.15262684" W Altitud:1719 metros	2°27'15.18038616" N 76°37'57.14892095" W Altitud:1719 metros				
2°27'15.11900402" N 76°37'57.10957219" W Altitud:1719 metros	2°27'15.08645648"N 76°37'57.10586635" W Altitud:1719 metros	2°27'15.05762188" N 76°37'57.07022348" W Altitud:1719 metros	2°27'14.98881387" N 76°37'57.09474889" W Altitud:1719 metros	2°27'15.02136141" N 76°37'57.0984547" W Altitud:1719 metros	
2°27'15.12271695" N 76°37'57.07763516" W Altitud:1719 metros	2°27'15.09016942"N 76°37'57.07392931" W Altitud:1719 metros	2°27'15.05390895" N 76°37'57.10216052" W Altitud:1719 metros	2°27'15.02507435"N 76°37'57.06651766" W Altitud:1719 metros	2°27'15"N 76° 37' 57.06281186" W Altitud:1719 metros	
2°27'15.13014282"N 76°37'57.0137611" W Altitud:1719 metros	2°27'15.09388235" N 76°37'57.04199228" W Altitud:1719 metros	2°27'15.06504775" N 76°37'57.00634941" W Altitud:1719 metros	2°27'15.02878728" N 76°37'57.03458063" W Altitud:1719 metros	2°27'14.99623975" N 76°37'57.03087482" W Altitud:1719 metros	
2°27'15.12642989"N 76°37'57.04569813"W Altitud:1719 metros	2°27'15.09759529" N 2°27'15.09759529" N Altitud:1719 metros	2°27'15.06133482" N 76°37'57.03828645" W Altitud:1719 metros	2°27'15.03250022" N 76°37'57.00264359" W Altitud:1719 metros	AP (0,0)	

Figura 3 Fingerprinting de coordenadas