

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE  
POSICIONAMIENTO PARA INTERIORES EN LA FIET, BASADO EN  
SIMULACIÓN**



**JEINER SANTIAGO MELENJE MARTINEZ**

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones**

**Departamento de Telecomunicaciones**

**Grupo de Radio e Inalámbricas - GRIAL**

**Popayán**

**2022**

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE  
POSICIONAMIENTO PARA INTERIORES EN LA FIET, BASADO EN  
SIMULACIÓN**



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

**JEINER SANTIAGO MELENJE MARTINEZ**

**Directora**

**MsC. Claudia Milena Hernández Bonilla**

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones**

**Departamento de Telecomunicaciones**

**Grupo de Radio e Inalámbricas - GRIAL**

**Sistemas de Comunicaciones Móviles e Inalámbricos**

**Popayán**

**2022**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1. CAPÍTULO 1: GENERALIDADES.....</b>	<b>2</b>
1.1. Sistemas de Posicionamiento.....	2
1.2. Sistemas de Posicionamiento en Interiores.....	2
1.2.1. Clasificación de los IPS.....	4
1.2.2. Métricas de Evaluación de los IPS.....	6
1.3. Técnicas de IPS.....	8
1.3.1. <i>Fingerprinting</i> .....	8
1.3.2. Triangulación.....	9
1.3.3. Trilateración.....	9
1.4. Parámetros de Señal.....	11
1.4.1. Tiempo de Llegada.....	11
1.4.2. Indicador de Intensidad de Señal Recibida.....	12
1.4.3. Ángulo de Llegada.....	13
1.4.4. Tiempo de Vuelo.....	14
1.5. Técnicas de Filtrado.....	14
1.5.1. Filtro De Kalman.....	15
1.5.1.1. Fase de Predicción.....	15
1.5.1.2. Fase de Corrección.....	16
1.5.2. Filtro de Kalman Extendido.....	16
1.5.3. Filtro de Kalman <i>Unscented</i> .....	17
1.6. Sensores opcionales para un IPS.....	18
1.7. Modelos de Propagación en Interiores.....	19
1.8. Herramienta de Simulación.....	19
<b>2. CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA DE DESARROLLO.....</b>	<b>21</b>
2.1. Introducción.....	21
2.2. Requerimientos.....	21
2.2.1. Problema de Estudio.....	21
2.2.2. Requerimientos Funcionales.....	22
2.2.3. Requerimientos No Funcionales.....	22
2.3. Diseño.....	22
2.3.1. Modelo del Sistema.....	22

2.3.2	Entorno de Simulación del IPS para la FIET .....	29
2.3.3	Modelo de Propagación log-normal <i>shadowing</i> .....	30
2.3.4	Gráficas de evaluación .....	30
<b>3.</b>	<b>CAPÍTULO 3: IMPLEMENTACIÓN .....</b>	<b>33</b>
3.1.1.	Definición de la Planimetría .....	33
3.1.2.	Edificio FIET en el Simulador.....	38
3.1.2.1.	Adaptación de Dimensiones .....	38
3.1.2.2.	Elementos para Planimetría.....	38
3.1.2.3.	Ubicación de Estaciones Base .....	39
3.1.3.	Trayectorias.....	41
3.1.4.	Señales de Atenuación.....	42
3.1.5.	Algoritmos de posicionamiento .....	43
3.1.6.	Gráficas de evaluación .....	44
<b>4.</b>	<b>CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO .....</b>	<b>45</b>
4.1.	Introducción.....	45
4.2.	Escenario 1.....	45
4.3.	Escenario 2.....	61
<b>5.</b>	<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>70</b>
5.1.	Conclusiones .....	70
5.2.	Trabajos Futuros .....	71
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>72</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Espacios del nivel dos.....	35
Tabla 3.2. Espacios designados del nivel tres de la FIET. ....	37
Tabla 4.1. Parámetros fijos de escenario uno. ....	45
Tabla 4.2. Ubicación BS tipo uno del escenario uno. ....	47
Tabla 4.3. Atenuaciones de la señal transmitida. ....	49
Tabla 4.4. Precisión y error máximo con distribución de BS tipo uno. ....	52
Tabla 4.5. Ubicación de BS tipo dos. ....	53
Tabla 4.6. Precisión y error máximo de estimación con distribución tipo dos. ....	55
Tabla 4.7. Precisión y error máximo de los algoritmos 2D, variando la frecuencia de muestreo.....	57
Tabla 4.8. Resultado del Test AD para escenario uno. ....	59
Tabla 4.9. Parámetros fijos para pruebas de funcionamiento.....	59
Tabla 4.10. Precisión de las trayectorias sobre un nivel.....	61
Tabla 4.11. Parámetros fijos de escenario 2. ....	61
Tabla 4.12. Ubicación de BS del nivel tres.....	64
Tabla 4.13. Precisión y error máximo de algoritmos 3D, variando la frecuencia de muestreo.....	65
Tabla 4.14. Resultado del Test AD para escenario dos. ....	66
Tabla 4.15. Parámetros fijos para prueba de funcionamiento. ....	66
Tabla 4.16. Precisión de las trayectorias sobre niveles dos niveles. ....	69

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Componentes principales de los IPS.....	3
Figura 1.2. Ejemplo de PDF con distribución normal, adaptada de [17]. ....	7
Figura 1.3. Triangulación en plano 2D. ....	9
Figura 1.4. Trilateración en 2D.....	10
Figura 1.5. Circulo formado por las mediciones de TOA. ....	12
Figura 1.6. Técnica de medición basada en AoA. Tomada de [2]. ....	13
Figura 1.7. Fases del Filtro de Kalman. ....	15
Figura 2.1. Metodología RUP. Adaptada de [50].....	21
Figura 2.2. Módulos del Simulador.....	22
Figura 2.3. Diagrama de Flujo General del Simulador.....	24
Figura 2.4. Diagrama de Flujo del Módulo de Planimetría.....	25
Figura 2.5. Diagrama de Flujo del Módulo de Trayectoria.....	26
Figura 2.6. Diagrama de Flujo de Módulo de Generación de Señales. ....	27
Figura 2.7. Diagrama de Flujo del Módulo de Procesamiento de Señales. ....	28
Figura 2.8. Diagrama de Flujo del Módulo de Métodos de Comparación. ....	29
Figura 2.9. Diagrama de Flujo de la FIET adaptada en el Simulador. ....	30
Figura 2.10. Diagrama de Flujo de las gráficas de evaluación del IPS en el edificio FIET.....	32
Figura 3.1. Plano segundo nivel del edificio FIET. ....	34
Figura 3.2. Área de circulación y accesos de la FIET.....	35
Figura 3.3. Plano tercer nivel del edificio FIET.....	36

Figura 3.4. Dimensiones del nivel dos. ....	38
Figura 3.5. Dimensiones del nivel tres. ....	38
Figura 3.6. Representación en la herramienta de Nodos y paredes. ....	39
Figura 3.7. Representación en la herramienta de Puertas y Escaleras. ....	39
Figura 3.8. Distribución de BS. ....	40
Figura 3.9. Segundo Nivel FIET. ....	40
Figura 3.10. Tercer Nivel FIET. ....	41
Figura 3.11. Ejemplo Trayectoria. ....	41
Figura 3.12. Trayectoria sobre nivel dos. ....	42
Figura 3.13. Trayectoria sobre nivel tres. ....	42
Figura 3.14. Atenuación (dB) vs Tiempo (segundos). ....	43
Figura 3.15. Presión (mmHg) vs Tiempo (segundos). ....	43
Figura 3.16. Algoritmos de posicionamiento. ....	44
Figura 3.17. Ejemplo de estimación. ....	44
Figura 4.1. Trayectoria para escenario uno. ....	46
Figura 4.2. Distribución de BS para escenario uno. ....	48
Figura 4.3. Señales de atenuación para escenario uno. ....	49
Figura 4.4. Estimación utilizando algoritmo EKF 2D. ....	50
Figura 4.5. PDF con distribución Weibull. ....	50
Figura 4.6. CDF con distribución Weibull. ....	51
Figura 4.7. Distribución de BS tipo dos. ....	54
Figura 4.8. Trayectoria sobre un nivel. ....	56
Figura 4.9. Trayectoria uno. ....	59
Figura 4.10. Trayectoria dos. ....	60
Figura 4.11. Trayectoria tres. ....	60
Figura 4.12. Distribución de BS para nivel tres. ....	62
Figura 4.13. Trayectoria No 1 sobre los niveles dos y tres. ....	67
Figura 4.14. Trayectoria No 2 sobre los niveles dos y tres. ....	68
Figura 4.15. Trayectoria No 3 sobre los niveles dos y tres. ....	69

## LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>AoA</b>	<i>Angle of Arrival</i> , Ángulo de Llegada.
<b>BF</b>	<i>Bayesian Filter</i> , Filtro Bayesiano.
<b>BLE</b>	<i>Bluetooth Low Energy</i> , Bluetooth de Baja Energía.
<b>BS</b>	<i>Base station</i> , Estación Base.
<b>CCD</b>	<i>Charge Coupled Device</i> , Dispositivo de Carga Acoplada.
<b>CDF</b>	<i>Cumulative Distribution Function</i> , Función de Distribución Acumulativa.
<b>DB</b>	<i>Data Base</i> , Base de Datos.
<b>DfPL</b>	<i>Device-free Passive Localization</i> , Localización Pasiva sin Dispositivo.
<b>EKF</b>	<i>Extended Kalman Filter</i> , Filtro Extendido de Kalman.
<b>GLONASS</b>	<i>Global Navigation Satellite System</i> , Sistema Global de Navegación por Satélite.
<b>GNSS</b>	<i>Global Navigation Satellite System</i> , Sistema Global de Navegación por Satélite.
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i> , Sistema de Posicionamiento Global.
<b>HF</b>	<i>High Frequency</i> , Frecuencia Alta.
<b>IPS</b>	<i>Indoor Positioning System</i> , Sistemas de Posicionamiento en Interiores.
<b>IR</b>	<i>Infrared Technology</i> , Tecnología Infrarrojo.
<b>JCGM</b>	<i>Joint Committee on Metrology Guidelines</i> , Comité Conjunto de Guías en Metrología.
<b>KF</b>	<i>Kalman Filter</i> , Filtro de Kalman.
<b>LBS</b>	<i>Location Based Services</i> , Servicios Basados en Localización.
<b>LF</b>	<i>Low Frequency</i> , Frecuencia Baja.
<b>LoS</b>	<i>Line of Sight</i> , Línea de Vista.
<b>PDF</b>	<i>Probability Density Function</i> , Función de Densidad de Probabilidad.
<b>RF</b>	<i>Radiofrequency</i> , Radiofrecuencia.
<b>RFID</b>	<i>Radio Frequency Identification</i> , Identificación por Radiofrecuencia.
<b>RSSI</b>	<i>Received Signal Strength Indication</i> , Índice de Intensidad de Señal Recibida.
<b>RT</b>	<i>Ray Tracing</i> , Trazado de Rayos.
<b>RUP</b>	<i>Rational Unified Process</i> , Proceso Unificado Racional.
<b>TDoA</b>	<i>Time Difference of Arrival</i> , Diferencia de Tiempo de Llegada.
<b>ToA</b>	<i>Time of Arrival</i> , Tiempo de Llegada.
<b>ToF</b>	<i>Time Of Flight</i> , Tiempo De Vuelo.
<b>US</b>	<i>Ultrasound</i> , Ultrasonido.
<b>UHF</b>	<i>Ultra High Frequency</i> , Frecuencia Ultra Alta.
<b>UKF</b>	<i>Unscented Kalman Filter</i> , Filtro Extendido de Kalman.
<b>UWB</b>	<i>Ultra Wide Band</i> , Banda Ultra Ancha.
<b>Wi-Fi</b>	<i>Wireless Fidelity</i> , Fidelidad Inalámbrica.
<b>WPS</b>	<i>Wi-Fi Positioning System</i> , Sistema de Posicionamiento Wi-Fi.



## INTRODUCCIÓN

En los últimos años determinar la posición de una persona, dispositivo o elemento ha sido tema fundamental de investigación, por tal motivo surgen los sistemas de posicionamiento, que permiten determinar la ubicación en cualquier lugar del planeta de un objetivo que se encuentre en un ambiente de exteriores, es decir, en espacios que tengan una Línea de Visión (LoS, *Line of Sight*) entre el objetivo y la Estación Base (BS, *Base Station*), dado que si existen obstáculos, las señales se atenúan y aumenta el margen de error en la ubicación del objetivo, siendo estos sistemas deficientes para ambientes de interiores.

Los sistemas de posicionamiento en interiores (IPS, *Indoor Positioning Systems*) se crean por la necesidad de localizar elementos en entornos de interiores. Para la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET) este tipo de sistemas de posicionamiento ha sido tema de investigación constante en los últimos años, por lo que han desarrollado diferentes sistemas prototipos, utilizando una gran variedad de tecnologías. Sin embargo, no se cuenta con un IPS a nivel de implementación o simulación que permita la ubicación de las personas y principalmente de los dispositivos con los que cuenta la facultad.

La implementación de un IPS en la FIET implica una gran cantidad de *Hardware* debido a la estructura y diseño del edificio, lo cual genera costos considerables, por tal motivo surge la opción de realizar una simulación de un IPS en la FIET que permita tener una visión general para una implementación a futuro. Con base en lo anterior, se plantea el objetivo general de este trabajo de investigación el cual es evaluar el desempeño de un sistema de posicionamiento para interiores en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET) de la Universidad del Cauca, basado en simulación.

Este documento está organizado de la siguiente manera, en el capítulo 1 se presentan las generalidades, en el capítulo 2 la metodología empleada para el desarrollo del IPS en la FIET basado en simulación, en el capítulo 3 la implementación del modelo de simulación, en el capítulo 4 la evaluación del desempeño y en el capítulo 5 conclusiones y trabajos futuros.





## 1. CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

### 1.1. Sistemas de Posicionamiento

Los sistemas de posicionamiento se han convertido en foco de investigación de las principales potencias mundiales, por lo que están invirtiendo de forma independiente para obtener características ideales de precisión, exactitud, confiabilidad y continuidad del servicio de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS, *Global Navigation Satellite System*), donde se destacan el Sistema Mundial de Navegación por Satélite (GLONASS, *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) de Rusia, Galileo de Europa, BeiDou de China y el Sistema de Posicionamiento Global (GPS, *Global Positioning System*) de los Estados Unidos, cabe resaltar que todos comparten los principios teóricos y funcionales [1].

El interés mundial en GNSS se debe a las decisiones estratégicas relacionadas con la seguridad y la creciente relevancia comercial de los Servicios Basados en Localización (LBS, *Location Based Services*), dado que continuamente se implementan nuevos LBS, lo que impulsa el crecimiento de nuevas aplicaciones basadas en la posición del usuario u objetivo [1]. En la actualidad, para una persona es sencillo saber en qué lugar del planeta se encuentra, solamente utilizando un teléfono inteligente podría ubicarse, sin embargo, la exactitud no es precisa, puesto que tienen un margen de error en la determinación de la ubicación y en ambientes de interiores la usabilidad de GNSS es limitada, debido a la falta de Línea de Visión (LoS, *Line of Sight*) y atenuación de las señales al atravesar obstáculos. Por tal motivo nacen los sistemas de posicionamiento especializados en ambientes de interiores [2].

### 1.2. Sistemas de Posicionamiento en Interiores

Los Sistemas de Posicionamiento en Interiores (IPS, *Indoor Positioning Systems*) permiten localizar personas u objetos en grandes edificaciones y lugares cerrados, es decir, espacios que no están al aire libre. Algunas funcionalidades de los IPS en la vida real son: localizar pacientes en hospitales, encontrar trabajadores en una planta, navegación en aeropuertos, estaciones ferroviarias y centros comerciales, por lo que la utilidad que brinda un IPS en la actualidad facilita indiscutiblemente el trabajo de la comunidad, dado que sin este sistema sería complejo realizar las funcionalidades mencionadas [3].

un IPS está constituido por una Estación Móvil (MS, *Mobile Station*), un medio de transmisión inalámbrico y BS, donde la MS es el objetivo a encontrar y continuamente transmite una señal que es captada por la BS, la figura 1.1 muestra un escenario general donde la BS capta los datos provenientes de las MS, estos son almacenados en una Base de Datos (DB, *Data Base*) para luego ser procesados mediante un algoritmo de posicionamiento y finalmente el sistema entrega una estimación de las coordenadas de la posición al usuario que desea encontrar la posición de la MS [4].

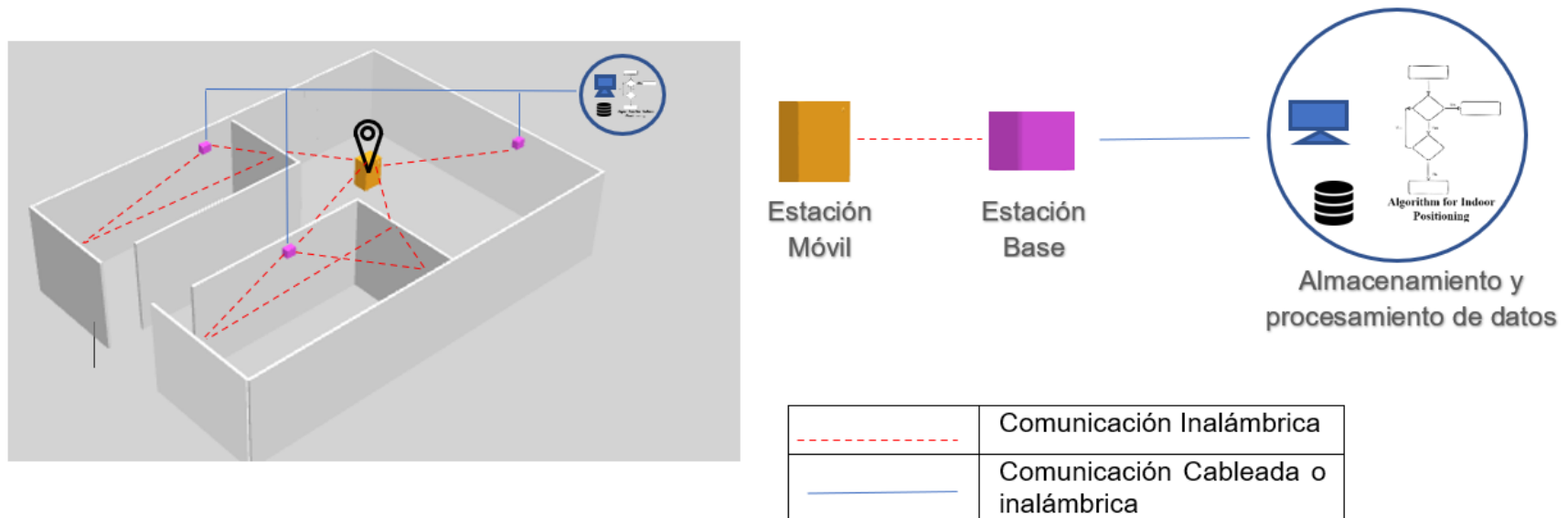


Figura 1.1. Componentes principales de los IPS.



### 1.2.1. Clasificación de los IPS

Los IPS se clasifican en sistemas activos y pasivos, actualmente los sistemas menos utilizados son los pasivos debido a su dificultad de diseño, ya que utilizan principalmente la navegación inercial o Navegación a Estima (DR, *Dead Reckoning*) y no necesitan que el objetivo a ser rastreado utilice una etiqueta o dispositivo que emita señales [5].

A diferencia de los sistemas pasivos, los activos necesariamente requieren que la MS participe activamente, es decir, la persona u objeto en seguimiento debe portar algún dispositivo electrónico capaz de enviar información al IPS [5]. Cuentan con un servidor o computador central que recibe todas las señales de las diferentes BS, para posteriormente realizar un proceso de cálculo de coordenadas del objetivo, utilizando los parámetros enviados desde las MS. Todas las BS deben instalarse en ubicaciones fijas dentro del edificio, las MS son responsables de enviar información a las BS y determinar el tiempo de retransmisión de la señal [6].

Cada IPS ya sea activo o pasivo debe utilizar una tecnología para realizar el posicionamiento. A continuación, se realiza la descripción detallada de las tecnologías usadas en cada uno de los sistemas.

#### 1.2.1.1. Tecnologías Empleadas en IPS Activos

##### A. Identificación por Radiofrecuencia (RFID, *Radio Frequency Identification*)

Permite transferir de forma inalámbrica datos entre una MS con etiqueta RFID y la BS, inicialmente la BS envía una señal continua dentro de un área determinada según las características del sistema, cuando la MS detecta la señal, responde a la BS para lograr su posicionamiento [7].

Existen dos tipos básicos de etiquetas RFID, activas y pasivas. El primero trabaja en el rango de Frecuencia Ultra Alta (UHF, *Ultra High Frequency*) y de microondas, requieren una fuente de alimentación ya sea conectado a una infraestructura o mediante baterías, para transmitir periódicamente su identificación, su característica principal es la operación a cientos de metros de la BS. La segunda trabaja en el rango de Frecuencia Baja (LF, *Low Frequency*), Frecuencia Alta (HF, *High Frequency*), UHF y microondas, son más ligeros y tienen menor precio en comparación con los activos, dado que no utilizan una fuente de alimentación y su alcance es limitado (máximo 2 m), un ejemplo de etiquetas pasivas son los productos de un establecimiento comercial que tienen una etiqueta en forma de llavero para localizar el producto y evitar su hurto [7][8].

##### B. Infrarrojo

La Tecnología Infrarroja (IR, *Infrared Technology*) hace uso de la radiación electromagnética con longitudes de onda más largas que el espectro de luz visible, un sistema simple de infrarrojos está compuesto por un diodo emisor de luz infrarroja y un fotodiodo receptor que detecta-captura los pulsos de luz para luego procesar y recuperar la información [2].

Dispositivos IR domésticos como controles remotos, están diseñados para tener una directividad baja, dado que el usuario en su mayoría no apunta exactamente al sensor receptor. Generalmente esta tecnología requiere LoS desde el emisor (MS) hasta el sensor



(BS), para los IPS es una gran desventaja, ya que la confiabilidad de la tecnología se afecta por la presencia de obstáculos que producen reflexión, refracción y difracción [2].

### C. Ultrasonido

La tecnología de ultrasonido en los IPS determina la posición del usuario utilizando la Diferencia de Tiempo de Llegada (TDoA, *Time Difference of Arrival*) entre el transmisor y el receptor, mediante frecuencias de sonido superiores al rango audible (mayor a 20 KHz) [2].

El sistema *Bat* es el pionero de la tecnología de ultrasonido [9]; fue desarrollado en los años noventa y utiliza una configuración activa que consta de una matriz de micrófonos fijos y una etiqueta en la MS, para localizar el objetivo se realiza un cálculo utilizando trilateración, donde se usan tres micrófonos, los cuales deben recibir un pulso de sonido para que puedan detectar la posición del usuario u objetivo [2].

### D. Bluetooth

Definido por el estándar IEEE 802.15.1, es uno de los sistemas de transmisión de datos entre dispositivos a corta distancia más populares en el mercado, para los IPS esta tecnología se ha considerado el competidor principal para la Fidelidad Inalámbrica (Wi-Fi, *Wireless Fidelity*) desde el surgimiento de la versión 4.0 o Bluetooth de Baja Energía (BLE, *Bluetooth Low Energy*) [10], por su bajo costo, bajo consumo de energía y compatibilidad con la mayoría de teléfonos inteligentes [2].

### E. WI-FI

Es la tecnología de comunicación inalámbrica más común en el mundo y la más utilizada para los IPS, originalmente fue creada para acceder a redes locales inalámbricas, pero en la actualidad su principal uso es establecer conexiones a internet, por tanto, Wi-Fi está disponible en la mayoría de lugares del planeta [11].

A partir de Wi-Fi surge el Sistema de Posicionamiento Wi-Fi (WPS, *Wi-Fi Positioning System*) el cual emite las señales utilizando puntos de acceso llamados Wi-Fi *hotspots* que se encuentran disponibles en la mayoría de los teléfonos inteligentes, dichas señales pueden ser medidas con el parámetro Indicador de Intensidad de Señal Recibida (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*). *Fingerprinting* es una de las técnicas más utilizadas para realizar el posicionamiento utilizando la tecnología Wi-Fi, debido a su fácil implementación y tolerancia al ruido producido en señales inalámbricas [12].

#### 1.2.1.2. Tecnologías Empleadas en IPS Pasivos

Los sistemas pasivos estiman la posición de una persona u objeto, el cual no debe tener ningún dispositivo electrónico para inferir su posición, basándose en la varianza de una señal medida [4]. A continuación, se describen las tecnologías empleadas para sistemas pasivos.

##### A. Localización Pasiva sin Dispositivo (DfPL, *Device-free Passive Localization*)

Esta tecnología utiliza las redes Wi-Fi existentes en el entorno para transmitir datos sin que el objetivo participe activamente en el proceso de posicionamiento, dado que se basa en las variaciones de los rangos de señales RF generados por el ambiente, los IPS que



adoptan el DfPL pueden tomar parámetros como Tiempo de Vuelo (ToF, *Time of Flight*) o RSSI y son utilizados para sistemas de seguridad tradicionales como detección de movimiento y videovigilancia [13].

### **B. Banda Ultra Ancha (UWB, *Ultra Wide Band*)**

Es una de las tecnologías más recientes y precisas, proporciona comunicación de alta velocidad de datos sobre el espacio de la red de área personal, se basa en la transmisión de pulsos extremadamente cortos y utiliza técnicas que provocan dispersión de la señal con una densidad espectral de potencia muy baja [13].

Las técnicas de posicionamiento UWB utilizan el parámetro TDoA de las señales para obtener la distancia entre el punto de referencia (BS) y el objetivo, trabajan en tiempo real para varias aplicaciones, como balizas de localización para servicios de emergencia, navegación interior para personas ciegas y con discapacidad visual, seguimiento de personas o instrumentos y reconocimiento militar [13].

### **C. Visión Artificial**

Los IPS que emplean esta tecnología utilizan la información recopilada por cámaras y técnicas de procesamiento de imágenes para identificar y rastrear objetos, existen dos configuraciones para un IPS utilizando visión artificial. En la primera el usuario u objeto a monitorear usa la cámara y captura imágenes o videos, estas son comparadas con archivos almacenados previamente en una DB que tienen información de la ubicación. El segundo está conformado por una o varias cámaras fijadas en un entorno apropiado para monitorear el objetivo y las imágenes capturadas se procesan para identificar la persona u objeto que está en el sitio [2].

#### **1.2.2. Métricas de Evaluación de los IPS**

En el diseño de un IPS se debe tener en cuenta que no existe una única solución que funcione correctamente, cabe destacar que las características del escenario cumplen un papel determinante en su desarrollo y una gran variedad de métricas permiten detectar el comportamiento de los IPS, las cuales se clasifican según las necesidades del usuario y las condiciones del ambiente. A continuación, se describen las más relevantes.

#### **A. Precisión**

Es la principal métrica en los IPS, está definida como la dispersión de un conjunto de datos que se obtienen a partir de múltiples mediciones, donde a menor dispersión, mayor precisión. La medida de dispersión más común es la desviación estándar<sup>1</sup> del error en la estimación y está dada por la ecuación (1.1) [16][17].

$$\sigma = \sqrt{V}, \quad (1.1)$$

donde  $\sigma$  es la desviación estándar y  $V$  es la varianza que se determina según la distribución de probabilidad que se ajuste a los datos de error; las distribuciones más comunes son: Normal, Gamma, Weibull, Log Normal y Exponencial, una manera de analizar la calidad de

---

<sup>1</sup> La desviación estándar es la medida del grado de proximidad de los datos con respecto al valor de la media, donde menor sea la desviación, menor es la dispersión de los datos, se expresa en las mismas unidades que los datos [14][15].



la precisión es mediante la Función de Densidad de Probabilidad (PDF, *Probability Density Function*) que muestra gráficamente la dispersión de los datos, la figura 1.2 muestra un ejemplo general de una PDF con distribución normal [17][18].

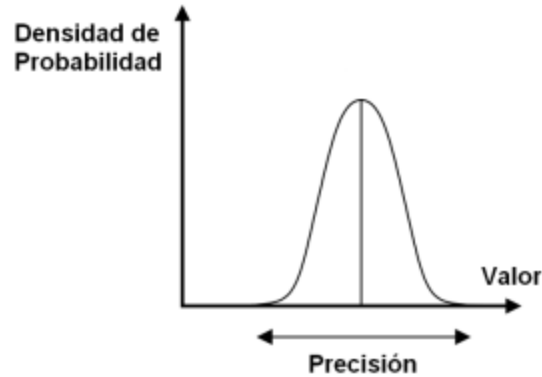


Figura 1.2. Ejemplo de PDF con distribución normal, adaptada de [17].

### B. Disponibilidad

La disponibilidad hace referencia al porcentaje de accesibilidad a los recursos de información, el objetivo de esta métrica es evaluar el tiempo en que la tecnología ofrece el servicio de posicionamiento y determinar si cumple con los requisitos de continuidad del IPS [19].

Uno de los requisitos principales para los IPS es utilizar una tecnología que esté fácilmente disponible en el dispositivo o etiqueta que porta el usuario, en otras palabras, tecnologías incluidas en la MS, con el fin de evitar costos de un nuevo *software* o *hardware*, por ejemplo, los sistemas basados en UWB han demostrado proporcionar una precisión de 10-20 cm, sin embargo, la mayoría de los dispositivos de usuario actuales no tienen chip UWB, por lo tanto, es importante tener sistemas de posicionamiento que puedan funcionar sin problemas con dispositivos ampliamente disponibles como los teléfonos inteligentes [7].

### C. Costos

Tiene en cuenta el dinero y tiempo necesario para el desarrollo completo del IPS, cuantificando la cantidad total de recursos, siendo este criterio decisivo en el diseño. Los costos se clasifican en tres niveles: la adquisición, que mide la capacidad de compra del *hardware* requerido; el establecimiento, que lleva a cabo el proceso de instalación y puesta en marcha del IPS; y por último soporte y mantenimiento [11].

### D. Exactitud

Definido por el Comité Conjunto de Guías en Metrología (JCGM, *Joint Committee on Metrology Guidelines*) como la proximidad entre el valor de cantidad estimada y el valor de cantidad verdadera, está definida como la distancia euclidiana media entre la posición estimada y real, esta sigue siendo un área muy desafiante para muchos investigadores, dado que la exactitud de un IPS es un factor clave para la mayoría de las aplicaciones [19].



## **E. Área de Cobertura**

Indica el área que cubre un determinado IPS, generalmente, para los sistemas de posicionamiento existen tres niveles de cobertura; local, escalable y global. La cobertura local se refiere a un área limitada y bien definida que no se puede ampliar, por ejemplo, una habitación o un edificio, mientras que la cobertura escalable representa la capacidad de un sistema para aumentar el área agregando algún tipo de *hardware* o *software* y finalmente, la cobertura global tiene un área mundial como el GPS [20].

Actualmente, los rangos de cobertura de los IPS oscilan entre cinco y cincuenta metros, por lo que proporcionar un sistema que tenga un rango igual o superior a sesenta metros es un desafío [20].

## **F. Latencia**

Es la suma de retardos temporales que tiene el IPS, es una métrica fundamental si se desea el posicionamiento en tiempo real, dado que el sistema debe informar la ubicación y las coordenadas de la MS sin ningún retraso perceptible, para lograrlo el sistema debe localizar al usuario con una pequeña cantidad de señales de referencia y realizar operaciones complejas en corto tiempo [7].

## **G. Complejidad**

La complejidad de un IPS depende de los elementos físicos o lógicos generados durante su desarrollo, los algoritmos de posicionamiento son los más comunes, puesto que su alcance es dinámico, generando continuos cambios en su estructura [21].

## **H. Escalabilidad**

Asegura que la función que desempeña un sistema no se vea afectada al momento de sufrir determinados cambios, los cuales son realizados para incrementar su alcance, en el caso de los IPS, la escalabilidad garantiza que el sistema trabaja normalmente cuando su nivel de cobertura aumenta [20].

### **1.3. Técnicas de IPS**

En las últimas décadas, los IPS han desarrollado una serie de técnicas para aumentar la precisión para determinar la posición de una persona, dispositivo o elemento que se encuentra en un ambiente de interiores, cabe resaltar que dependiendo de los componentes del sistema, cierta técnica proporciona un cálculo más rápido y una mayor precisión. Las técnicas utilizadas con mayor frecuencia son *Fingerprinting*, Triangulación y Trilateración [22].

#### **1.3.1. *Fingerprinting***

Consiste en almacenar la información en una DB que está conformada por el parámetro RSSI de una determinada zona en interiores, tiene dos fases: la calibración o fase *offline*, recolecta las medidas para construir el patrón de referencia, mientras que la segunda denominada fase en línea o fase *online*, compara las medidas que genera la MS con la información recopilada, para así deducir la posición [23][24].



### 1.3.2. Triangulación

La triangulación determina la posición de la MS midiendo los ángulos desde su posición hasta las BS, en un plano bidimensional se requieren como mínimo 2 BS de recepción para realizar la estimación, mientras que en un plano tridimensional se necesita solo uno, donde el parámetro de señal estándar es el Ángulo de Llegada (AoA, *Angle of Arrival*). La triangulación fortalece la propiedad del círculo vacío, es decir, para cada triángulo formado por tres puntos, se encuentra un círculo que pasa por ellos sin encerrar más puntos, una desventaja de esta técnica es que las piezas electrónicas como motores, láseres, diodos o balizas dificultan la construcción y desarrollo del sistema [25].

La figura 1.3 describe el funcionamiento de la triangulación en dos dimensiones, donde  $BS1$ ,  $BS2$  y  $BS3$  tienen sus respectivos ángulos  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  y  $\phi_3$ , los cuales determinan la posición de la MS y están relacionados con el ángulo  $\theta$  que determina la dirección [25].

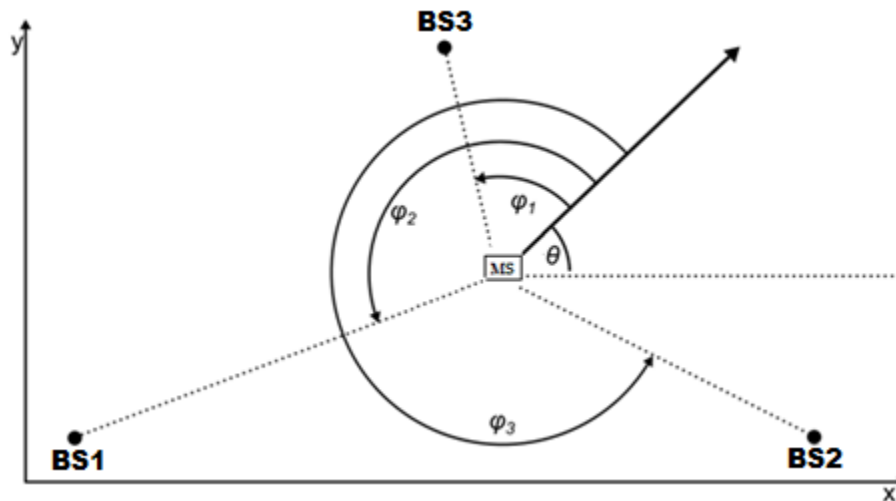


Figura 1.3. Triangulación en plano 2D.

### 1.3.3. Trilateración

Esta técnica estima la posición de la MS conociendo al menos las posiciones de tres BS y la distancia de estos con la MS, para obtener dichas distancias se utilizan los parámetros de señal RSSI, AoA o el Tiempo De Llegada (ToA, *Time of Arrival*) [26].

La trilateración para un entorno de dos dimensiones (2D) se muestra en la figura 1.4, donde  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  y  $(x_3, y_3)$  son las coordenadas de referencia, los círculos formados toman como radio la distancia desde la BS a la MS u objetivo a rastrear, con esto se garantiza que el objetivo se encuentra en la intersección de los tres círculos [26].



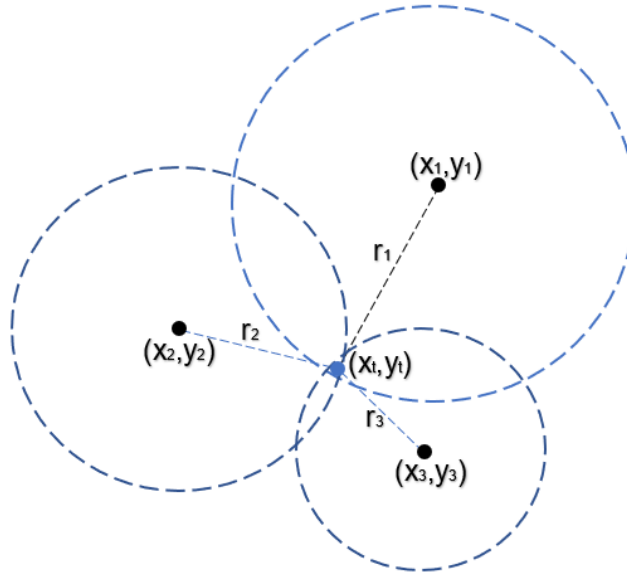


Figura 1.4. Trilateración en 2D.

La posición de la MS se calcula mediante el sistema de ecuaciones (1.2), definida como:

$$\begin{aligned} r_1^2 &= (x_t - x_1)^2 + (y_t - y_1)^2, \\ r_2^2 &= (x_t - x_2)^2 + (y_t - y_2)^2, \\ r_3^2 &= (x_t - x_3)^2 + (y_t - y_3)^2, \end{aligned} \quad (1.2)$$

donde  $(x_t, y_t)$  son las coordenadas de ubicación del usuario,  $r_1, r_2$  y  $r_3$  son las distancias medidas entre el objetivo y los puntos de referencia. Como es una técnica de posicionamiento relativa, se considera uno de los puntos de referencia como origen de coordenadas, simplificando el sistema de ecuaciones (1.2) a (1.3).

$$\begin{aligned} r_1^2 &= x_t^2 + y_t^2, \\ r_2^2 &= (x_t - x_2)^2 + (y_t - y_2)^2, \\ r_3^2 &= (x_t - x_3)^2 + (y_t - y_3)^2, \end{aligned} \quad (1.3)$$

La finalidad de las ecuaciones es encontrar las coordenadas del objetivo a localizar, por ello se realiza una serie de procesos para llegar al valor de  $x_t$  y  $y_t$ , como se observa en las ecuaciones (1.4) y (1.5).

$$x_t = -\frac{1}{2} \left( \frac{y_2(r_3^2 - x_3^2 - r_1^2) + y_3(r_1^2 - r_2^2 - y_2^2 + x_2^2)}{x_3 y_2 - x_2 y_3} \right), \quad (1.4)$$

$$y_t = \sqrt{r_1^2 - x_t^2}, \quad (1.5)$$

La técnica de trilateración genera el error de compensación en alineaciones horizontales o verticales, los cuales se definen en el conjunto de ecuaciones (1.6).

$$\begin{aligned} r_{a1} &= r_{m1} + \delta_1, \\ r_{a2} &= r_{m2} + \delta_2, \end{aligned} \quad (1.6)$$



$$r_{a3} = r_{m3} + \delta_3,$$

donde  $\delta_1, \delta_2$  y  $\delta_3$  es el error de compensación de  $r_1, r_2$  y  $r_3$  respectivamente, los radios reales son  $r_{a1}, r_{a2}$  y  $r_{a3}$  con sus radios medidos relativos  $r_{m1}, r_{m2}$  y  $r_{m3}$ . La diferencia entre el punto real  $(x_t, y_t)$  y el punto calculado se muestra en las ecuaciones (1.7) y (1.8).

$$\Delta_x = x_t - x'_t, \quad (1.7)$$

$$\Delta_y = y_t - y'_t, \quad (1.8)$$

donde  $(x'_t, y'_t)$  es el punto calculado y  $(\Delta_x, \Delta_y)$  es la diferencia entre ambos y se calcula utilizando las ecuaciones (1.9) y (1.10) [27].

$$\Delta_x = -\frac{1}{2} \left( \frac{-y_2 \delta_E^2 + 2\delta_E(r_1(y_3 + y_2) - r_3 y_2 - y_3 r_2)}{x_3 y_2 - x_2 y_3} \right), \quad (1.9)$$

$$\Delta_y = \frac{\delta_E^2(y_3(r_1 - r_2) + x_2(r_3 - r_1))}{x_3 y_2 - x_2 y_3}, \quad (1.10)$$

donde se supone que el máximo error de compensación se describe como  $(\delta_E)$ , este error está asociado a las coordenadas de referencia y sus radios.

#### 1.4. Parámetros de Señal

Las técnicas de posicionamiento hacen uso de parámetros de señal empleados para medir la distancia entre la BS y la MS, los más utilizados son ToA, RSSI, AoA y ToF, estos son explicados a continuación.

##### 1.4.1. Tiempo de Llegada

Este parámetro se basa en que la distancia es proporcional al tiempo de propagación, ToA conoce el tiempo exacto en que la MS envía la señal, el tiempo exacto en que la BS capta la señal y la velocidad con la que viaja, para esto se debe sincronizar perfectamente las BS y la MS, dado que si existen errores de sincronización los datos obtenidos serán incorrectos y por consiguiente afecta el posicionamiento. La distancia entre MS y BS está dada por la ecuación (1.11) [20].

$$r = (t_i - t_0) * c, \quad (1.11)$$

donde  $r$  es la distancia de BS-MS,  $c$  es la velocidad de la luz con la que viajan las señales,  $t_0$  es el instante de tiempo en el que la MS comienza a transmitir,  $t_i$  es el instante de tiempo en que la señal es captada por la BS [28]. Utilizando la distancia  $r$  y la ecuación de un círculo, se obtiene la ecuación (1.12) [21].

$$r = \sqrt{(x_i - x_t)^2 + (y_i - y_t)^2} = c(t_i - t_0), \quad (1.12)$$

donde  $(x_i, y_i)$  es la posición de la BS y  $(x_t, y_t)$  es la ubicación de la MS. El resultado de la ecuación (1.12) se muestra en la figura 1.5, donde existe un círculo con la distancia como su radio, se debe realizar el mismo procedimiento con al menos dos más BS para obtener tres círculos, con esta información se usa el algoritmo de trilateración explicado para localizar la MS [21][28].

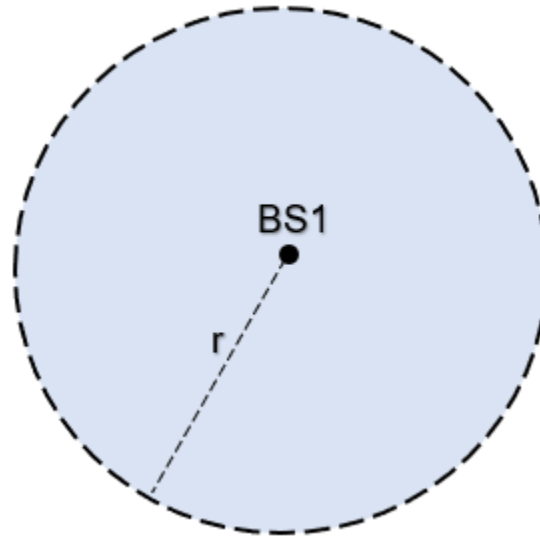


Figura 1.5. Círculo formado por las mediciones de TOA.

#### 1.4.2. Indicador de Intensidad de Señal Recibida

Es uno de los parámetros de posicionamiento más populares en la actualidad, debido a que permite tomar una medición de potencia de la señal enviada desde la MS a la BS o viceversa. De acuerdo a la ley del cuadrado inverso, las ondas de radio se atenúan y su intensidad disminuye a medida que aumenta la distancia, por dicha razón, la distancia se aproxima en función de la intensidad de la señal transmitida y recibida, la combinación de esta información con un modelo de propagación ayuda a determinar la posición del objetivo [22] [29].

RSSI es uno de los parámetros más económicos y fáciles de implementar, pero en muchos casos no proporciona la mejor precisión, por lo que es necesario el filtrado para mejorar la precisión del sistema. Los valores de RSSI se relacionan con la distancia como se muestra en la ecuación (1.13) [22].

$$RSSI = 10 \log \left( \frac{P_{recibida}}{P_{referencia}} \right), \quad (1.13)$$

donde  $P_{recibida}$  es la potencia de señal recibida,  $P_{referencia}$  es la potencia de referencia que se toma desde una distancia conocida, la cual suele ser de un metro. La potencia es inversamente proporcional a la distancia, dado esto se muestra la ecuación (1.14) [22][30].

$$\frac{P_{recibida}}{P_{referencia}} \approx \frac{1}{r^n}, \quad (1.14)$$

donde  $r$  es la distancia entre la MS y la BS,  $n$  es el exponente de pérdidas de trayectoria que se elige de acuerdo al entorno y se calcula a partir de la medición de potencia y las distancias, como se muestra en la ecuación (1.15) [30][31][32].

$$n = \frac{P_{recibida} - P_{referencia}}{10 \log_{10} \frac{r}{r_0}}, \quad (1.15)$$



donde  $r_0$  es la distancia de referencia que se utiliza para medición de la potencia de referencia. A partir de las ecuaciones (1.13) y (1.14) se muestra la ecuación (1.16) [22][31].

$$RSSI (dbm) = -10n \log_{10}(r (metros)) + C, \quad (1.16)$$

donde  $C$  es una constante fija la cual varía según la potencia referencia. Como el objetivo es encontrar la distancia, la ecuación (1.16) se despeja en función de  $r$ , como se muestra en la ecuación (1.17) [31].

$$r(metros) = 10^{\frac{RSSI-C}{-10n}}, \quad (1.17)$$

### 1.4.3. Ángulo de Llegada

Este parámetro proporciona una medición del ángulo que indica la dirección de la señal que llega a la BS y define una línea recta que pasa a través de la MS, la combinación de varias líneas de diferentes BS ubica la MS en su intersección, entre mayor número de BS tenga el IPS mejor es la exactitud. Para obtener las distancias entre las BS-MS y la posición de la MS es necesario al menos dos BS y dos ángulos, en la figura 1.6 se muestra la MS, dos BS  $BS1$  y  $BS2$  con sus respectivos ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$ . Para realizar las mediciones del AoA se utiliza una matriz de antenas o una antena direccional, la principal ventaja de AoA es que no requiere sincronización de tiempo [2][33].

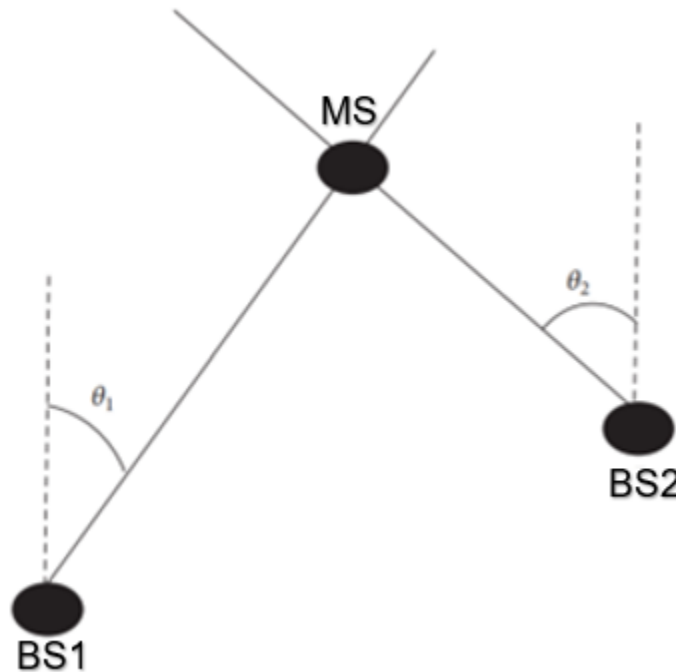


Figura 1.6. Técnica de medición basada en AoA. Adaptada de [2].



#### 1.4.4. Tiempo de Vuelo

Este parámetro mide la distancia de un objetivo utilizando el tiempo de retraso entre la emisión de un pulso y su detección en el receptor, ToF en un IPS requiere detectores rápidos y eficientes [23].

#### 1.5. Técnicas de Filtrado

Los parámetros de señal descritos anteriormente generan errores de precisión a causa de mediciones ruidosas, por lo que es necesario adaptar Filtros Bayesianos (BF, *Bayesian Filter*) que se enfocan en la estimación del estado dinámico e intentan construir PDF posterior del estado, basándose en toda la información disponible incluyendo el conjunto de mediciones recibidas, la PDF incorpora toda la información estadística disponible para obtener la medida que determina la estimación [34][35].

El BF representa un marco probabilístico para la estimación de estados recursivos y la distribución de una incertidumbre denominada creencia, la cual está descrita por la ecuación (1.18) [35][36].

$$Bel(x_k) = f(x_k|z_{1:k}), \quad (1.18)$$

donde  $k$  es el instante de tiempo actual,  $x_k$  es la variable aleatoria que representa el espacio de estados en el tiempo actual y la cinética del usuario,  $Bel(x_k)$  es la creencia la cual es la probabilidad de  $x_k$  y representa la incertidumbre de posición de la MS,  $z_{1:k}$  es el conjunto de todas las medidas de la BS desde la primera hasta la  $k$ , por lo que  $f(x_k|z_{1:k})$  es la PDF de  $x_k$  dado  $z_{1:k}$ . La creencia depende de todas las mediciones obtenidas en cada instante de tiempo, donde la complejidad aumenta con el paso del tiempo, para resolver este problema el BF utiliza propiedades markovianas de primer orden, ya que toda la información necesaria para calcular una estimación de posición en el tiempo  $k$  viene dada por la información disponible en el tiempo  $k - 1$ . El BF consta de dos pasos: Predicción y Corrección, el primero está descrito por la ecuación (1.19) [35][36].

$$Bel^-(x_k) = \int f(x_k|x_{k-1}) Bel(x_{k-1}) dx_{k-1} \quad (1.19)$$

donde  $Bel^-(x_k)$  es la creencia en el paso de predicción, el término  $f(x_k|x_{k-1})$  describe la dinámica del sistema, dado que en cada periodo  $x_k$  se actualiza basándose en el estado previo  $x_{k-1}$ . El segundo paso corrige la creencia cada vez que adquiere una nueva medición de la BS y está descrita por la ecuación (1.20) y (1.21) [35][36].

$$Bel^+(x_k) = Q_k f(z_k|x_k) Bel^-(x_k) \quad (1.20)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} Bel(x_k) dx_k = 1 \quad (1.21)$$

donde  $Bel^+(x_k)$  es la creencia en el paso de corrección,  $Q_k$  representa la constante de normalización que se usa para asegurar que la ecuación (1.21) se cumpla. El término  $f(z_k|x_k)$  representa el modelo de observación, es decir, la probabilidad de tener la medición de la BS  $z_k$  dado el estado  $x_k$ . En un IPS, el término  $f(x_k|x_{k-1})$  representa el modelo de movimiento, mientras que el término  $f(z_k|x_k)$  depende de la tecnología de la BS y el método para determinar la ubicación [35][36].



El BF tiene una serie de implementaciones que han sido utilizados para lograr una mayor precisión en la estimación del objetivo, los más conocidos son el Filtro de Kalman (KF, *Kalman Filter*), Filtro de Kalman Extendido (EKF, *Extended Kalman Filter*) y el Filtro de Kalman “Unscented” (UKF, *Unscented Kalman Filter*), dado a su flexibilidad para encontrar el estado oculto no medible de un sistema determinado[24][27]. A continuación, se presentan dichos filtros.

### 1.5.1. Filtro De Kalman

Es un algoritmo propuesto por Rudolf E. Kalman en el año 1960, soluciona el problema de estimación de variables de estado en un sistema dinámico de una manera óptima tomando en cuenta el ruido (incertidumbre) presente tanto en las variables medidas (valores entregados por las BS) como en las variables de control (variables no aleatorias), brinda una excelente estimación a partir de las variables conocidas. KF es el indicado para sistemas lineales que tienen una ecuación de estado que describe su comportamiento y cuenta con una ecuación de medición que representa la relación entre las variables de estado y la salida de las BS, para utilizar el KF en un IPS debe cumplir con los siguientes requerimientos [37].

- Las ecuaciones deben estar descritas en tiempo discreto.
- El ruido de medición y el ruido del sistema son independiente entre sí.
- Ambos ruidos siguen una distribución gaussiana.

El KF en un IPS se desarrolla mediante dos fases, predicción y corrección como se muestra en la figura 1.7, estas se repiten infinitamente y cada iteración recibe información de las BS, estas fases se describen a continuación [27].

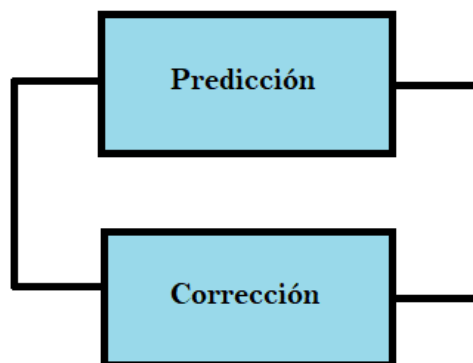


Figura 1.7. Fases del Filtro de Kalman.

#### 1.5.1.1. Fase de Predicción

Comienza con la estimación inicial en el instante actual ( $k$ ), llamada también como predicción a priori, su función es indicar en que posición debe estar la trayectoria (donde estuviera la ecuación de estado), está descrita por la ecuación (1.22) y (1.23).



$$\hat{X}_k^- = A\hat{X}_{k-1} + BU_{k-1}, \quad (1.22)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q, \quad (1.23)$$

donde  $\hat{X}_k^-$  es la estimación a priori del estado en el instante  $k$ ,  $A$  es la matriz de transición con dimensiones  $n * n$ ,  $\hat{X}_{k-1}$  es la estimación a posteriori del instante anterior,  $B$  es la matriz de control con dimensiones  $n * m$ ,  $U_{k-1}$  es un vector de control del instante anterior el cual es termino conocido,  $P_k^-$  es la covarianza del error de la estimación a priori,  $P_{k-1}$  es la covarianza a posteriori del instante anterior,  $A^T$  es la matriz de transición transpuesta y  $Q$  es la matriz de covarianza del ruido del modelo dinámico con dimensiones  $n * n$ .

La estimación a priori de la trayectoria se ejecuta con base en el modelo dinámico del sistema, considerando la estimación del instante anterior sin tener en cuenta la información más reciente captada por las BS [37].

#### 1.5.1.2. Fase de Corrección

También llamada estimación a posteriori, toma los datos de la fase de predicción y realiza el proceso de corrección, haciendo uso de la información actual de las BS y esta descrita por las ecuaciones (1.24), (1.25) y (1.26).

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k * (Z_k - H\hat{X}_k^-), \quad (1.24)$$

$$P_k = (I - K_kH) * P_k^-, \quad (1.25)$$

$$K_k = P_kH^T * (HP_k^-H^T + R)^{-1}, \quad (1.26)$$

donde  $\hat{X}_k$  es la estimación a posteriori del estado en el instante  $k$ ,  $K_k$  es la matriz de ganancias de Kalman en el instante  $k$ ,  $Z_k$  es el vector de medición el cual contiene la información que captan las BS y es de dimensión  $i$ ,  $H$  es la matriz de medición,  $P_k$  es la covarianza del error de la estimación a posteriori,  $I$  es una matriz unitaria,  $H^T$  es la matriz de medición transpuesta y  $R$  es la matriz de covarianza del ruido de medición con dimensiones  $i * i$ .

En esta fase el algoritmo obtiene una estimación a posteriori de la trayectoria en el instante actual, corrigiendo la estimación de la fase de predicción con la información actual captada por las BS, la ecuación de la covarianza del error de la estimación a posteriori permite disminuir la incertidumbre gracias a la matriz de ganancia de Kalman  $K_k$ .

Cabe resaltar que ninguna de las fases sería capaz de producir una óptima estimación de la trayectoria por sí sola, dado que al utilizar únicamente la fase a priori del sistema, habría una acumulación paulatina del error y gradualmente crecería la incertidumbre. Si se usa solamente la fase a posteriori, habría saltos rudos en la estimación, los cuales serían causados por el ruido de medición incluso cuando el sistema se encuentre estático [37].

#### 1.5.2. Filtro de Kalman Extendido

Consiste en una variación del KF para abordar el problema de estimación de la trayectoria cuando el modelo es no-lineal, una de las grandes limitaciones que sufre el KF es que solamente aplica para sistemas lineales, por dicha razón surge el EKF, haciendo uso de un



modelo de estado no lineal en cada instante de tiempo alrededor de la última coordenada conocida [37].

EKF utiliza la serie de Taylor para aplicar derivadas parciales y las ecuaciones de estado, con el fin de linealizar la función para posteriormente aplicar las fases predicción-corrección, la ecuación (1.27) esta descrita por una función no lineal y un ruido blanco, la ecuación (1.28) representa el vector de medición.

$$X_k = g(U_k, X_{k-1}) + W_{k-1}, \quad (1.27)$$

$$Z_k = h(X_k) + V_k, \quad (1.28)$$

donde  $X_k$  es la ecuación de estado del EKF,  $g$  es una función no lineal,  $W_{k-1}$  es el ruido blanco del instante anterior ( $k - 1$ ),  $Z_k$  es el vector de medición con dimensión  $i$ ,  $h$  es una función no lineal,  $V_k$  es el vector de control no aleatorio  $p$ -dimensional.

Se asume que los ruidos de medición siguen una distribución gaussiana y además se debe considerar que  $g$  y  $h$  sean funciones diferenciables, con el fin de aproximar linealmente la función en un punto el cual es la media, la ecuación (1.29) y (1.30) definen la matriz jacobiana que está formada por derivadas parciales de primer orden [37].

$$G_k = \frac{\partial g}{\partial X_k}, \quad (1.29)$$

$$H_k = \frac{\partial h}{\partial X_k}, \quad (1.30)$$

Finalmente, al tener la ecuación linealizada se aplica el KF descrito anteriormente para lograr la estimación de la trayectoria, el EKF funciona en ambientes con obstáculos, interferencia, ruido, atenuación, entre otros [37].

### 1.5.3. Filtro de Kalman *Unscented*

El UKF es otra solución desarrollada para realizar estimaciones en sistemas no lineales, también es llamado Filtro de Kalman de Punto Sigma o Filtro de Kalman de Regresión Lineal, a diferencia del EKF que linealiza la función a partir de un punto, este emplea una regresión lineal de "n" puntos extraídos del estado actual de la variable aleatoria gaussiana y los mapea en el siguiente estado a través del sistema no lineal verdadero, capturando la nueva media y covarianza con una mayor precisión que el EKF. Se muestra la ecuación (1.31) [38][39].

$$S = g(x), \quad (1.31)$$

donde se considera la posibilidad de propagar una variable aleatoria  $x$  con dimensión  $L$ , a través de una función no lineal. Suponiendo que  $x$  tiene media  $\check{x}$  y una covarianza  $P_x$ , para calcular las estadísticas de  $S$  se forma una matriz  $X$  de  $2L + 1$  puntos sigma  $X_i$  (con los correspondientes pesos  $W_i$ ), con base en lo anterior se presentan las ecuaciones (1.32), (1.33), (1.34), (1.35), (1.36), (1.37) y (1.38).

$$X_0 = \check{x}, \quad (1.32)$$





$$X_i = \check{x} + (\sqrt{L + \lambda}P_x)_i, \quad (1.33)$$

$$X_i = \check{x} - (\sqrt{L + \lambda}P_x)_{i-L} \quad i = L + 1, \dots, 2L, \quad (1.34)$$

$$W_0^{(m)} = \frac{\lambda}{L + \lambda}, \quad (1.35)$$

$$W_0^{(c)} = \frac{\lambda}{L + \lambda} + (1 - \alpha^2 + \beta), \quad (1.36)$$

$$W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = \frac{1}{2(L + \lambda)}, \quad (1.37)$$

$$\lambda = \alpha^2(L + K) - L, \quad (1.38)$$

donde  $L, K$  son los parámetros de escala,  $\alpha$  determina la extensión de los puntos sigma alrededor de la media  $\check{x}$ ,  $\beta$  incorpora los conocimientos previos de la distribución de  $x$ ,  $(\sqrt{L + \lambda}P_x)_i$  es la  $i$ -ésima fila de la raíz cuadrada de la matriz. Estos puntos sigma son propagados a través de una función no lineal dada en la ecuación (1.39).

$$S_i = g(X_i), \quad (1.39)$$

La media y la covarianza de  $S$  se aproximan, haciendo uso de una media muestral ponderada y la covarianza de los puntos sigma posteriores, están descritas por las ecuaciones (1.40) y (1.41) [40].

$$\check{S} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} S_i, \quad (1.40)$$

$$P_S = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} \{S_i - \check{S}\} \{S_i - \check{S}\}^T, \quad (1.41)$$

El UKF es ampliamente utilizado en IPS, dado que evita la compleja solución matricial jacobiana en el proceso de linealización, reduciendo fluctuaciones de los datos [40][41].

## 1.6. Sensores opcionales para un IPS

Con el paso del tiempo se han utilizado dispositivos para medir la presión y campo magnético para optimizar la precisión y exactitud de un IPS, los más comunes son el barómetro y magnetómetro, los cuales se describen a continuación [42].

### 1.6.1. Barómetro

Se usa para determinar la altitud en un IPS, midiendo la presión del aire para correlacionarla con la altura, dado que la presión atmosférica disminuye cuando aumenta la altitud. La altura se interpreta en términos de la medición de presión atmosférica  $P_k$  y se utiliza la ecuación (1.42) [42][43] [44].

$$Altura = \frac{Temperatura_0}{L_a} \left( \left( \frac{P_k}{Presión_0} \right)^{\frac{-L_a R_a}{G}} - 1 \right) + \epsilon_{h,k}, \quad (1.42)$$

donde  $L_a$  es la tasa de aumento de temperatura en la atmósfera al aumentar la altitud,  $Temperatura_0$  y  $Presión_0$  es la temperatura y presión respectivamente cuando la altitud es



cero,  $R_a$  es la constante de gas para el aire y  $G$  es la aceleración de la gravedad, se asume un modelo de ruido gaussiano aditivo simplificado  $\epsilon_{h,k} \sim N(0, R_h)$ .

### 1.6.2. Magnetómetro

Es un dispositivo que se utiliza para medir campos magnéticos con respecto a su fuerza y dirección, en IPS es usado para determinar la dirección del objetivo; el primero que se construyó fue el magnetómetro bifilar en el año 1831 por Gauss y Weber, a lo largo de la historia diferentes tipos de sensores han operado sobre la base magnética que está muy ligada al desarrollo y al descubrimiento de nuevos efectos físicos. La inducción magnética  $B$  esta descrita por la ecuación (1.43) [43].

$$B = \mu_0 H_{fuerza} + J, \quad (1.43)$$

donde  $\mu_0$  es la permeabilidad del vacío,  $H_{fuerza}$  es la fuerza del campo magnético y  $J$  es la polarización magnética, en algunos casos el magnetómetro se utiliza en conjunto con sensores inerciales como el giroscopio para optimizar la dirección del objetivo a localizar.

### 1.7. Modelos de Propagación en Interiores

Se utilizan para representar las pérdidas que sufre una señal en ambientes de interiores, uno de los modelos más empleados en los IPS es el log-normal *shadowing* que describe los efectos de sombreado aleatorio que ocurren entre la BS-MS, siguiendo una distribución log-normal, es un modelo empírico que se basa en los resultados estadísticos de medidas realizadas sobre un determinado terreno y está descrito por la ecuación (1.44) [45][46][47][48].

$$L (dB) = L_0 + 10 n \log d (m) + X_\sigma, \quad (1.44)$$

donde  $L_0$  es la pérdida a una distancia de un metro,  $n$  es una variable de pérdidas del trayecto,  $X_\sigma$  es una variable aleatoria gaussiana expresada en dB con media cero y desviación estándar  $\sigma$ . Los valores de  $n$  y  $X_\sigma$  dependen del entorno [45][46][47][48].

### 1.8. Herramienta de Simulación

Cualquier IPS debe contar con una variedad de mediciones, dado que una colección de pocos casos agrega sesgos no deseados a determinados sistemas, por lo tanto, es necesario realizar pruebas en varios entornos y en diferentes trayectorias. Sin embargo, obtener medidas experimentales de este tipo es costoso en términos de tiempo y recursos, debido a que necesita hardware, por dicha razón se han desarrollado diferentes herramientas que posibilitan simular estos sistemas, algunas de estas son: Pylayers [32], Simulador para Métodos de Localización en Interiores (SMILe, *Simulator for Methods of Indoor Localization*) [33] y Navindoor [34].

Pylayers ofrece la posibilidad de procesar las señales dentro del simulador, pero los datos simulados solo pueden ejecutarse con un algoritmo de posicionamiento en el software, por dicha razón enfatiza la exportación de sus resultados en un procesamiento externo, y es un simulador complejo. SMILe permite desarrollar y evaluar métodos de ubicación en interiores, sin embargo, aún está en desarrollo y solamente tiene implementada una funcionalidad básica [32].



Finalmente, Navindoor, es una herramienta de simulación para el diseño, testeo y evaluación de un IPS, fue desarrollada en Matlab®; es escalable, pero solo está desarrollado para un entorno particular y no considera un modelo de pérdidas para interiores [49].



## 2. CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA DE DESARROLLO

### 2.1. Introducción

En este capítulo se describe el proceso de diseño de un IPS para la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET), basado en simulación, además se plantean los requisitos del sistema y se realiza la evaluación del desempeño [50].

La metodología empleada para el desarrollo de este trabajo de grado es una adaptación del Proceso Racional Unificado (RUP, *Rational Unified Process*), el cual presenta un enfoque disciplinado para la asignación de tareas y responsabilidades, con el objetivo de asegurar la producción de alta calidad que satisfaga las necesidades de un determinado proyecto con un estricto cumplimiento de un calendario. La figura 2.1 muestra las etapas, donde inicia con los requerimientos, luego se realiza un análisis y diseño para lograr la implementación del proyecto y ejecutar el despliegue de pruebas, la característica principal de RUP es la retroalimentación entre las etapas que plantea, es decir, una vez que termine el proyecto se regresa a la etapa inicial y se verifica si necesita alguna adición o se encuentra finalizado completamente [50].

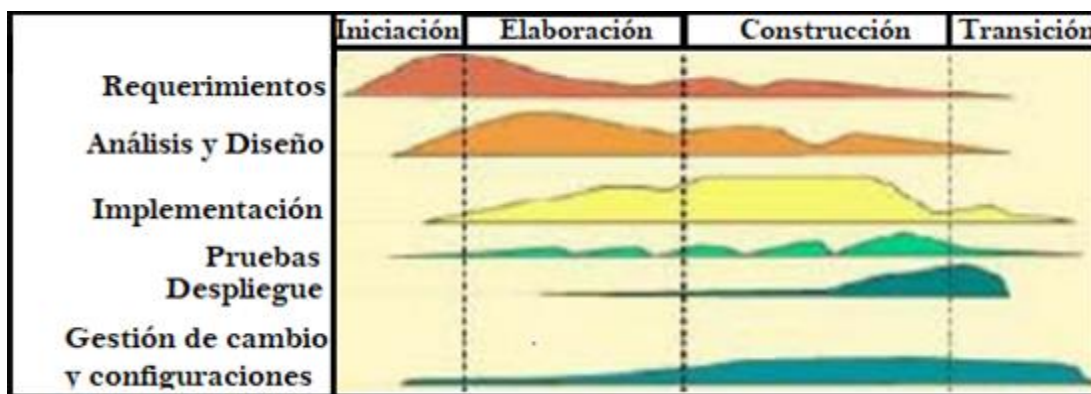


Figura 2.1. Metodología RUP. Adaptada de [51].

### 2.2. Requerimientos

Inicialmente se explica el problema de estudio y posteriormente se realiza un análisis de requerimientos para enumerar las diferentes características del sistema, estos pueden ser funcionales o no funcionales.

#### 2.2.1. Problema de Estudio

Actualmente, la FIET cuenta con una gran variedad de dispositivos que ayudan a realizar las tareas y funciones del personal de la Facultad, los más relevantes son: computadores, video proyectores, generadores de señal y osciloscopios, pero en ocasiones no se conoce en qué lugar se encuentran, dado que no existe ningún IPS a nivel de implementación que permita el posicionamiento de estos y de las personas que los manipulan; sin embargo, implementar un IPS requiere *hardware*, el cual genera altos costos, debido a la estructura y diseño del edificio, por lo que surge la necesidad de tener un IPS basado en simulación que permita realizar una primera aproximación de dicho sistema para su implementación a futuro.



### 2.2.2. Requerimientos Funcionales

- Determinar el posicionamiento de un elemento o dispositivo de la FIET, basado en simulación.
- Desplegar en forma gráfica la estimación de la ubicación del objetivo.
- Evaluar el desempeño del IPS implementado con la métrica de precisión.

### 2.2.3. Requerimientos No Funcionales

- El IPS debe funcionar en versiones de Matlab® compatibles con la versión 2018<sup>a</sup>.

## 2.3. Diseño

En esta sección se describen las características del IPS en la FIET y las funciones que realiza para satisfacer los requerimientos planteados. Con la ayuda de diagramas de flujo se muestra el funcionamiento del simulador y como se ajusta para realizar el sistema de posicionamiento en interiores del edificio FIET.

### 2.3.1 Modelo del Sistema

Navindoor fue desarrollado por la universidad de Deusto en Bilbao, España; cuenta con cinco módulos los cuales se muestran en la figura 2.2. El módulo de planimetría permite caracterizar el escenario donde se desarrolla el IPS, en el cual se definen las restricciones de movimiento, posición de puntos de acceso, entre otros. El módulo de trayectoria permite trazar trayectorias dentro de la planimetría creada, estas se modelan con una sucesión de puntos con sus coordenadas, así como el instante de tiempo correspondiente para obtener velocidades por diferenciación, permitiendo conseguir una vista previa. El módulo de generación de señales simula señales de la ruta previamente establecida, con el fin de generar datos que pueden procesar los algoritmos de posicionamiento. El módulo de procesamiento de señales contiene dos algoritmos básicos: EKF y UKF, estos realizan una estimación de la ubicación del objetivo. Finalmente, el módulo de métodos de comparación permite generar gráficas para comparar las diferentes estimaciones de la trayectoria con la información exacta, dado que desde el punto de vista de código se tienen los datos exactos de la trayectoria real y la estimada.

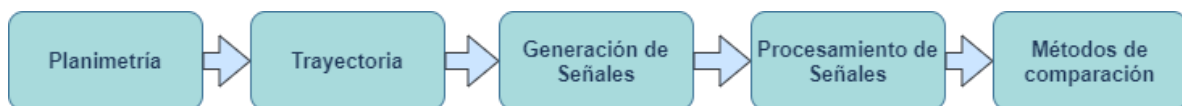
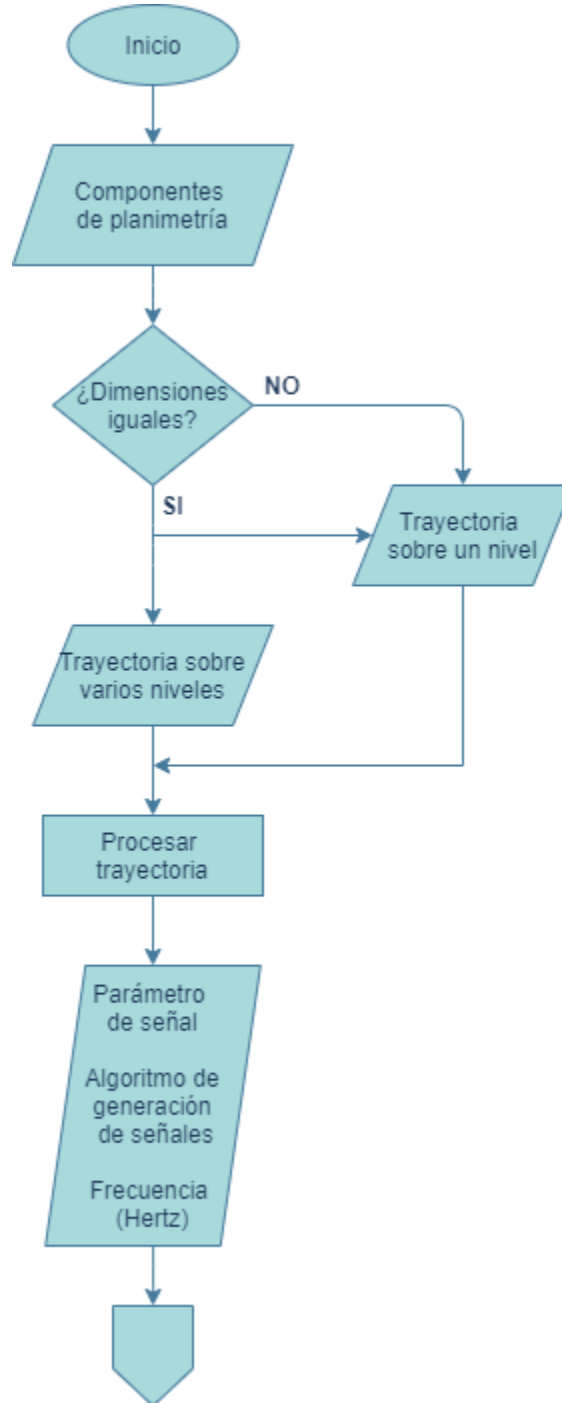


Figura 2.2. Módulos del Simulador.

Este trabajo de grado plantea ajustar los módulos de planimetría, generación de señales y métodos de comparación. En la planimetría se busca generar un entorno de simulación del edificio FIET, en la generación de señales diseñar un modelo de pérdidas que representen las condiciones de interiores de esta infraestructura y finalmente en métodos de comparación reevaluar el sistema. Se presenta un diagrama de flujo general de la herramienta en la figura 2.3, donde inicialmente se definen las entradas para la construcción del IPS y se fijan las dimensiones de los planos para determinar si el tipo de trayectoria es



sobre uno o varios niveles. Posteriormente se determina la frecuencia y el parámetro de señal con su respectivo algoritmo que generan las señales de atenuación, luego se usa el algoritmo de posicionamiento para procesarlas y estimar la trayectoria, finalmente se obtienen las gráficas de evaluación y comparación.





**Figura 2.3. Diagrama de Flujo General del Simulador.**

A continuación, mediante diagramas de flujo se hace una descripción de los procesos y funciones de cada módulo, además se presenta el ajuste de los módulos mencionados para establecer el sistema de posicionamiento para interiores en el edificio FIET, basado en simulación.

- **Módulo de Planimetría**

El módulo de planimetría está descrito por la figura 2.4, este permite cargar el plano por defecto o implementar una nueva planimetría, fijando las dimensiones para determinar si es de uno o varios niveles.

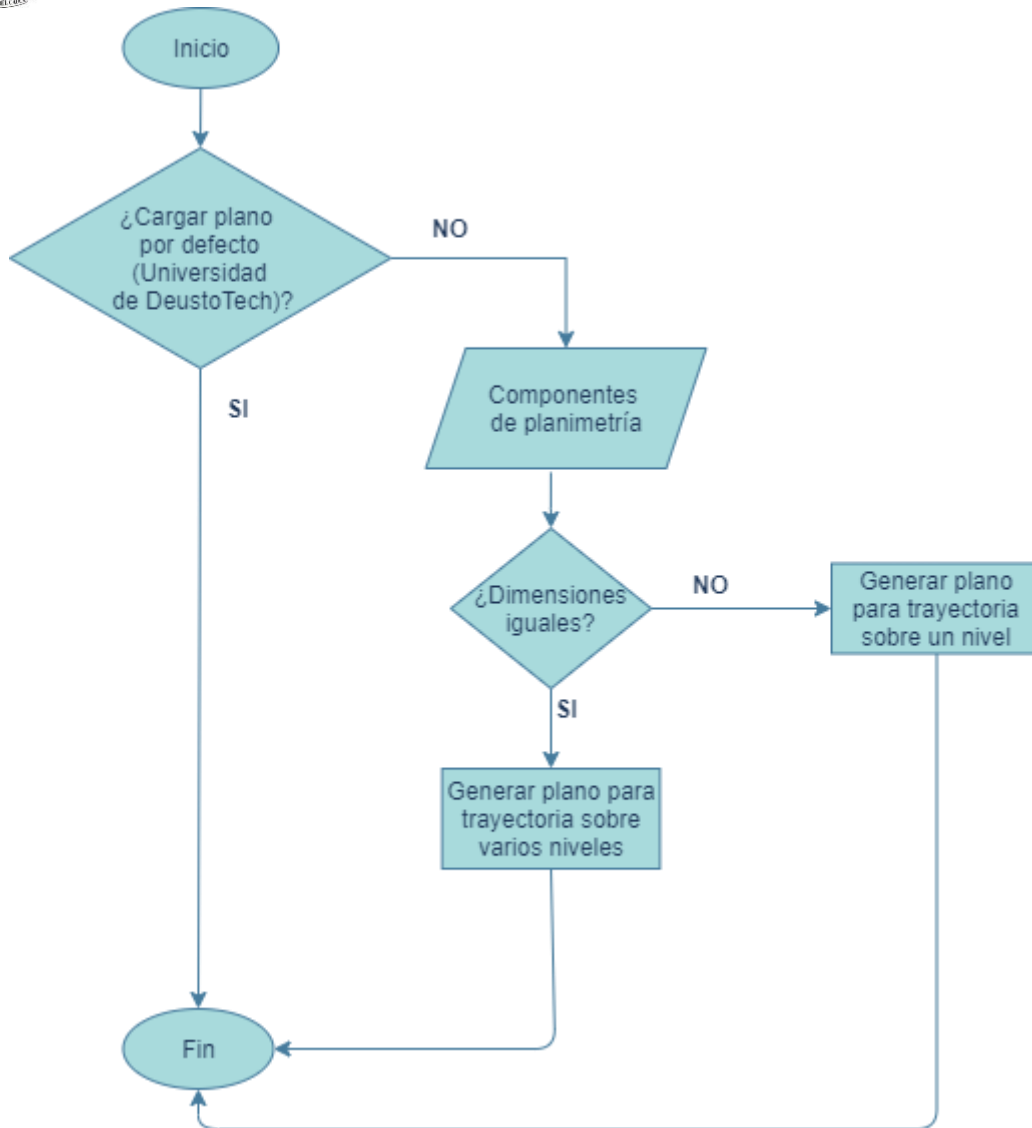


Figura 2.4. Diagrama de Flujo del Módulo de Planimetría.

- **Módulo de Trayectoria**

El módulo de trayectoria se muestra en la figura 2.5, este verifica las características del plano creado en el módulo de planimetría para generar la trayectoria y determinar su alcance.



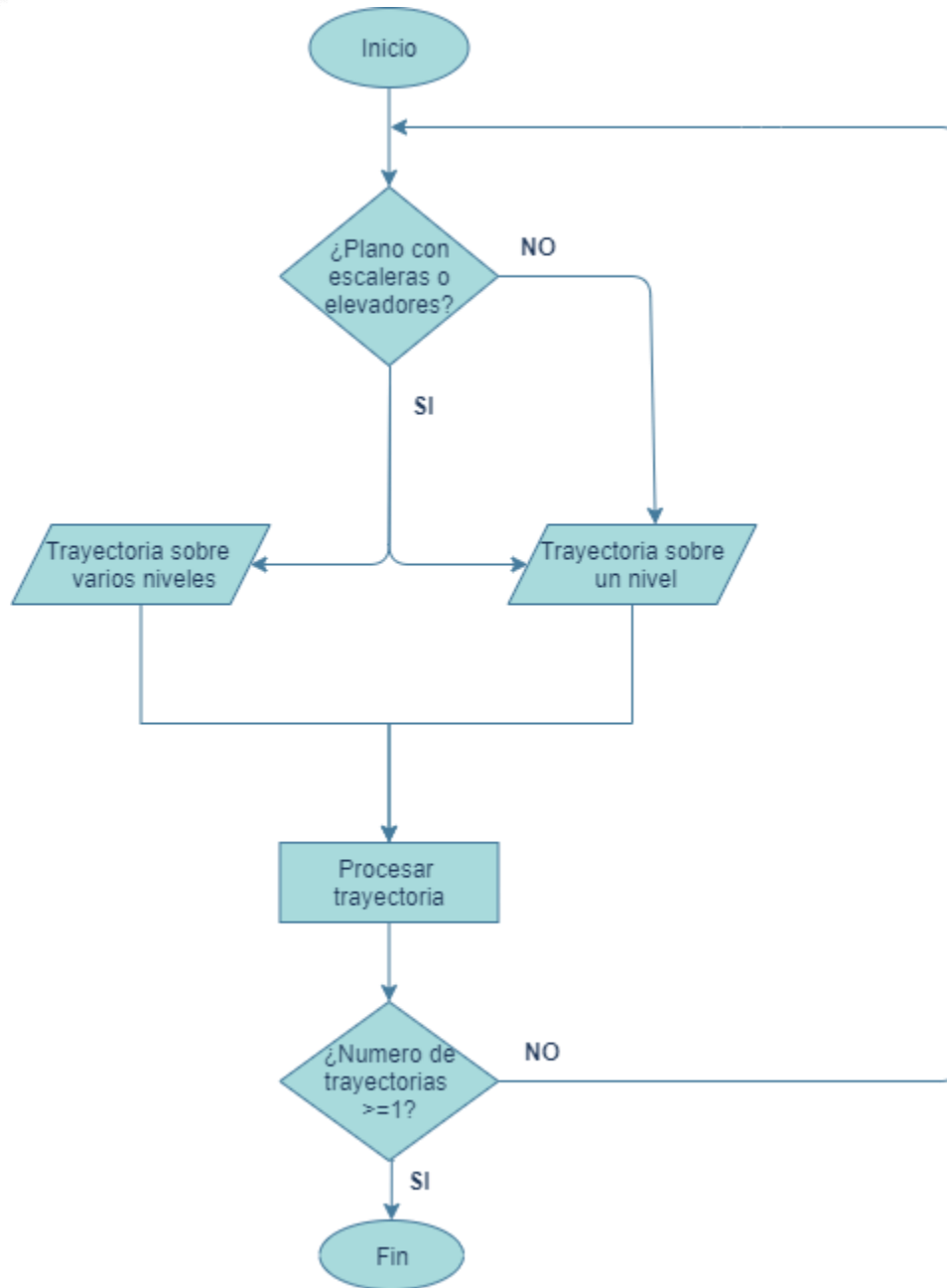


Figura 2.5. Diagrama de Flujo del Módulo de Trayectoria.

- **Generación de Señales**

En la figura 2.6 se muestra el módulo de generación de señales, inicialmente se garantiza que la trayectoria haya sido creada, luego se define la frecuencia, parámetro y algoritmo que generan las señales. Existen dos tipos de generación de señales, el primero debe tener al menos una BS instalado en la planimetría para utilizar los parámetros RSS, ToF y AoA, los cuales indican la atenuación, tiempo de vuelo y ángulos respectivamente que se crean durante la trayectoria. El segundo usa el barómetro y pie inercial para detectar los cambios de presión y las rotaciones respectivamente, sin necesidad de BS.

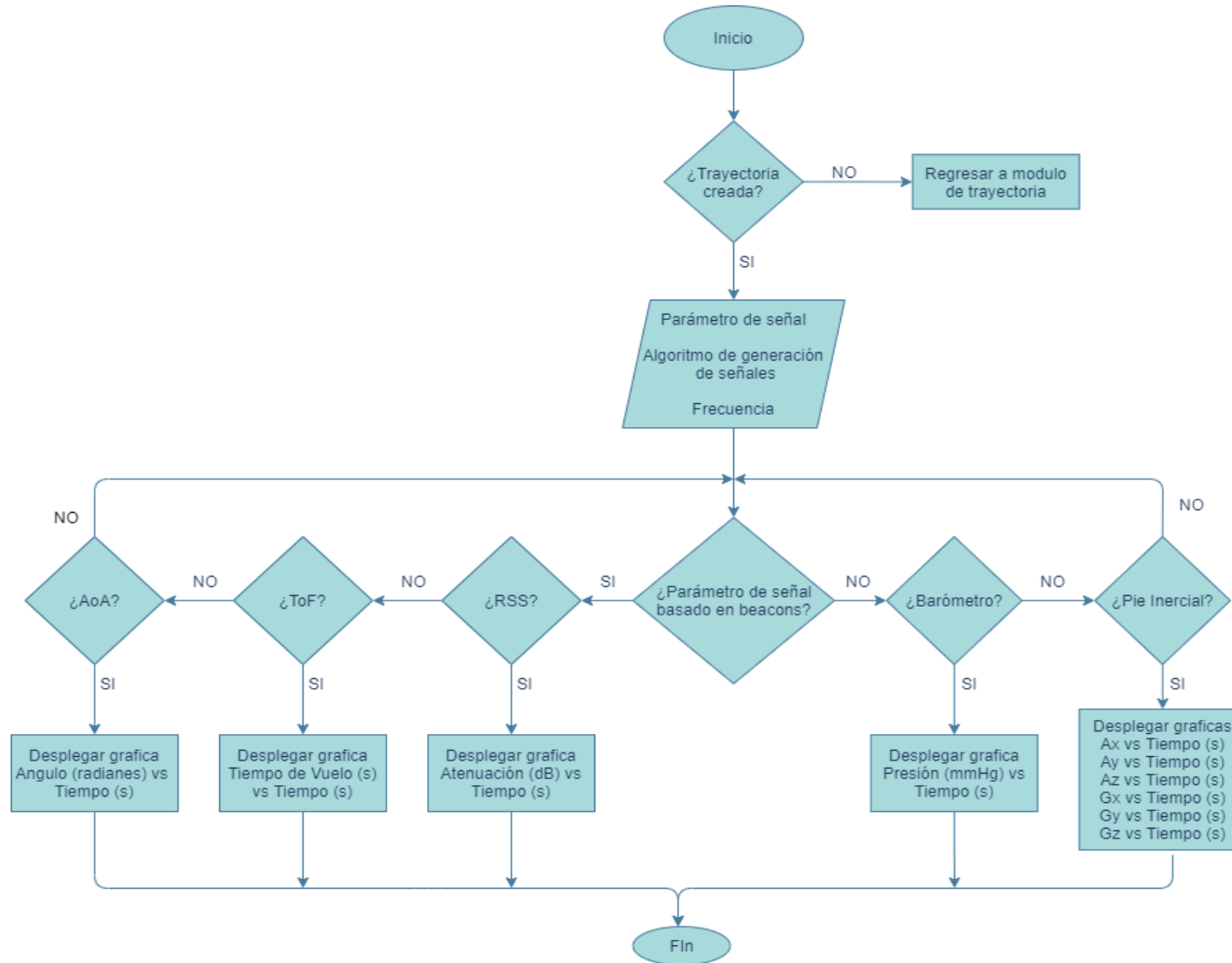
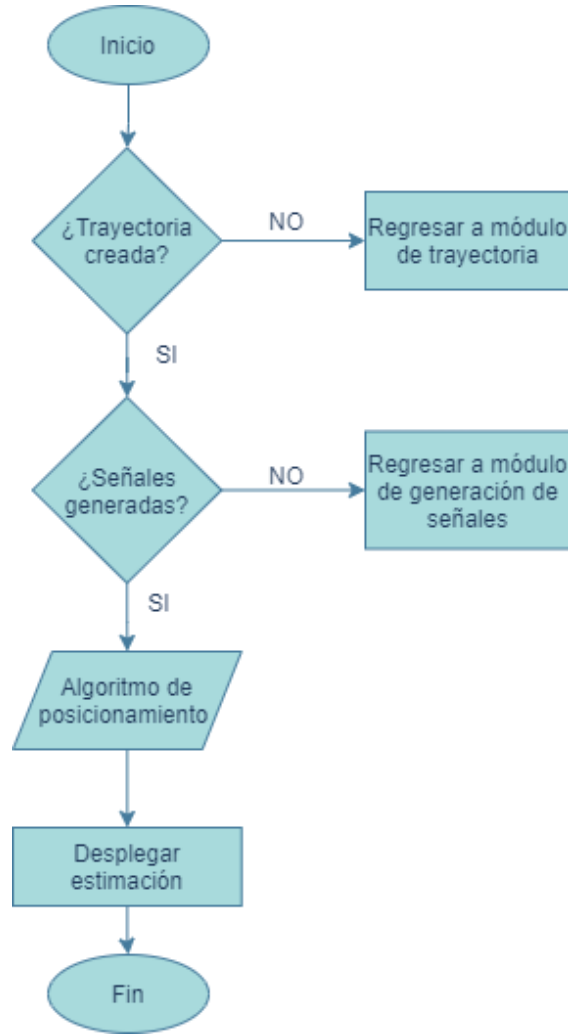


Figura 2.6. Diagrama de Flujo de Módulo de Generación de Señales.



- **Procesamiento de Señales**

El módulo de procesamiento de señales se muestra en la figura 2.7, asegura la creación de la trayectoria y de las señales para utilizar el algoritmo de posicionamiento y obtener la estimación gráficamente.



**Figura 2.7. Diagrama de Flujo del Módulo de Procesamiento de Señales.**

- **Métodos de Comparación**

El módulo de métodos de comparación se muestra en la figura 2.8, este realiza la evaluación del desempeño del sistema, inicialmente se verifica la generación de la trayectoria y las señales en los módulos anteriores para desplegar las gráficas de Probabilidad acumulativa vs Distancia (metros) y Error (metros) vs Tiempo (segundos).

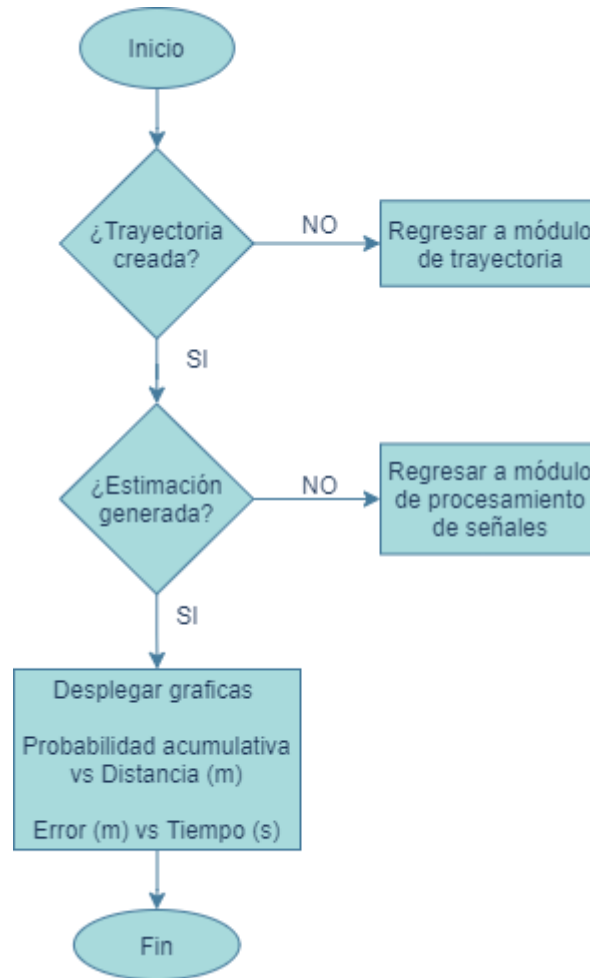


Figura 2.8. Diagrama de Flujo del Módulo de Métodos de Comparación.

### 2.3.2 Entorno de Simulación del IPS para la FIET

Para generar el entorno de simulación de un IPS sobre los niveles dos y tres del edificio FIET se realizan una serie de ajustes en el módulo de planimetría de la herramienta, los cuales se muestran en la figura 2.9, inicialmente se fijan las dimensiones de los planos del edificio para garantizar una trayectoria con movilidad sobre los dos niveles, luego se distribuyen los salones, puertas y escaleras en cada planta física.



Figura 2.9. Diagrama de Flujo de la FIET adaptada en el Simulador.

### 2.3.3 Modelo de Propagación log-normal *shadowing*

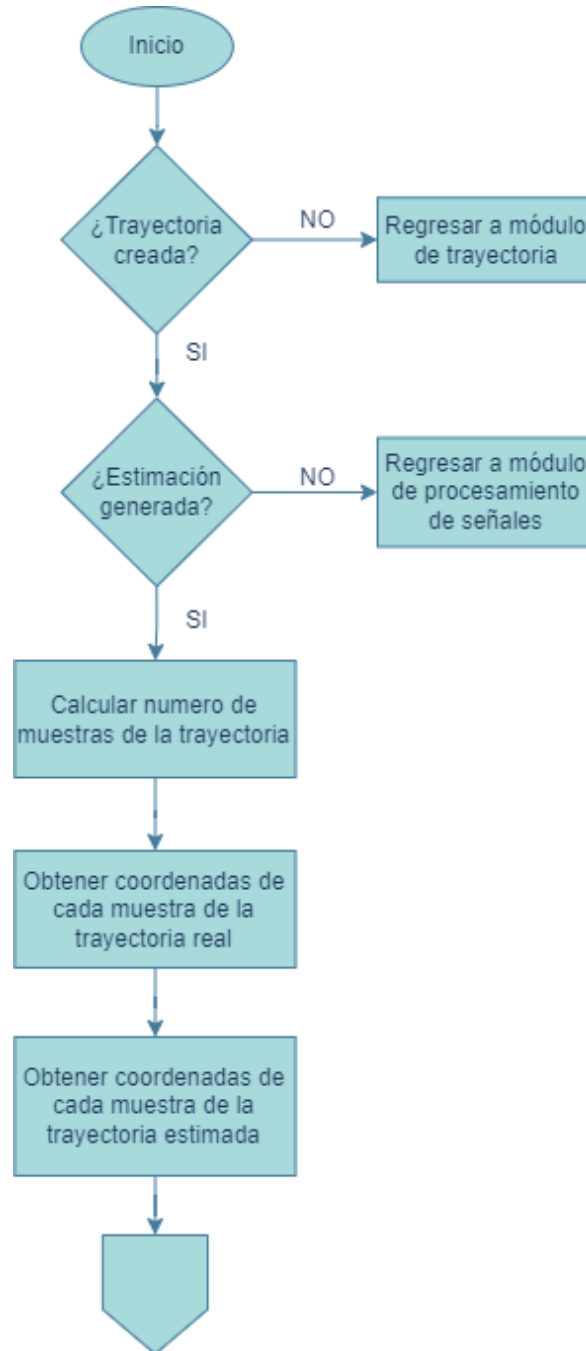
Se define el modelo de propagación log-normal *shadowing* para representar el ambiente de interiores del edificio FIET, considerando la ecuación (1.44). El valor de  $L_0 = 74.38 \text{ dB}$  se obtiene a partir de las mediciones realizadas en el edificio FIET por el trabajo de grado [52], el valor determinado para la variable de pérdidas del trayecto es  $n = 2.6$ , dado que en ambientes de interiores con las características de la infraestructura del edificio FIET este valor es el más adecuado, finalmente, la desviación estándar se basa en los resultados obtenidos por [45] en el primer nivel del edificio *Walnut Creek* de San Francisco, USA el cual es  $\sigma = 3.2 \text{ dB}$ , en este trabajo se tiene una combinación de LoS y NLoS en cualquier nivel de la trayectoria [45][53][47].

### 2.3.4 Gráficas de evaluación

Para generar las gráficas de evaluación del IPS del edificio FIET se realizan una serie de ajustes en el módulo de métodos de comparación de la herramienta, los cuales se muestran



en la figura 2.10. Inicialmente, se debe garantizar que la trayectoria y estimación hayan sido generadas para calcular el número de muestras que se tomaron durante la trayectoria. Las coordenadas de cada muestra tanto de la trayectoria real como la estimada se obtienen con el fin de encontrar la distancia euclidiana en cada periodo, para determinar los datos de error, finalmente se emplea una distribución de probabilidad que se ajuste a los datos para evaluar el desempeño del sistema mediante las gráficas PDF y CDF.



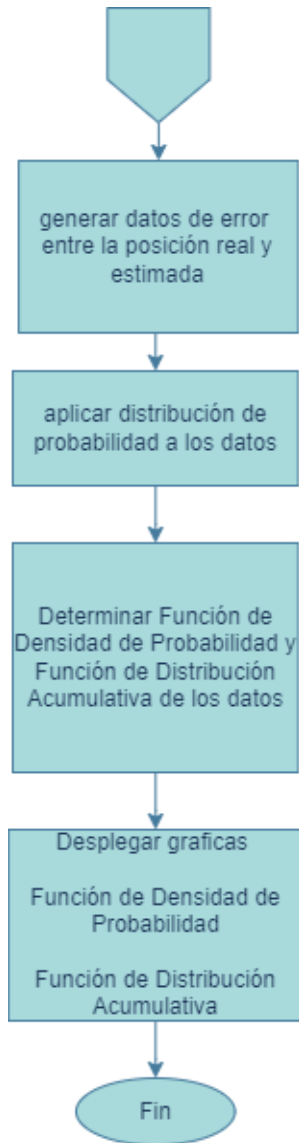


Figura 2.10. Diagrama de Flujo de las gráficas de evaluación del IPS en el edificio FIET.



### **3. CAPÍTULO 3: IMPLEMENTACIÓN**

En este capítulo se presentan los procesos y funciones desarrollados para generar el entorno de simulación de un IPS en el edificio FIET y evaluar su desempeño.

#### **3.1.1. Definición de la Planimetría**

Para definir la planimetría se obtuvieron los planos del edificio<sup>2</sup>. La figura 3.1 muestra el nivel dos con sus medidas generales y la tabla 3.1 indica la distribución de los espacios.

---

<sup>2</sup> Los planos de los niveles dos y tres del Edificio FIET fueron suministrados por la oficina de planeación de Universidad del Cauca.



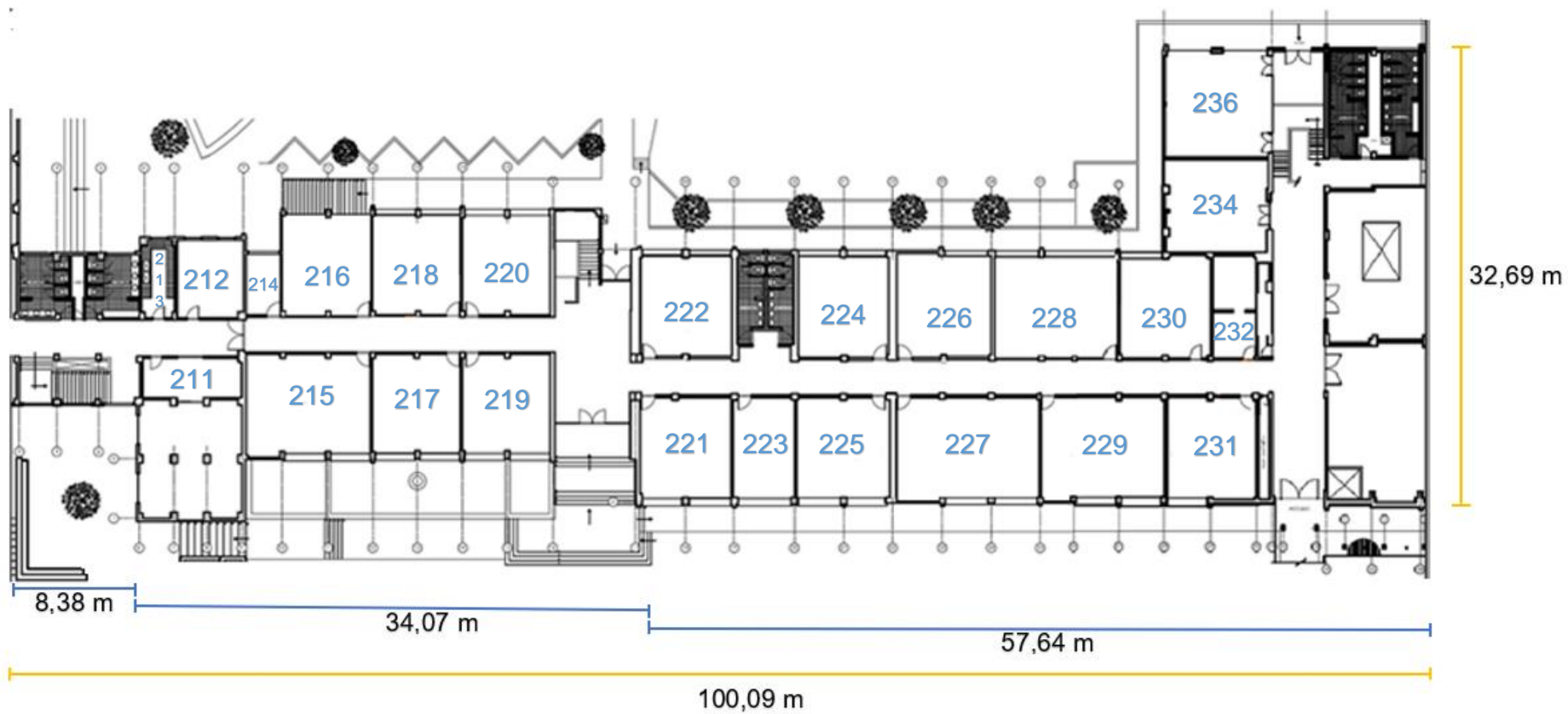


Figura 3.1. Plano segundo nivel del edificio FIET.



Espacio designado	Número
Salones de clase	221, 222, 224, 225, 226, 227, 229, 230, 231, 234 y 236
Laboratorio de antenas	223
Salón piloto	228

Tabla 3.1. Espacios del nivel dos.

La figura 3.2a muestra el área de circulación del nivel dos, el cual tiene un ancho de 2.75 m y se observa el acceso principal de sur a norte que tiene un ancho de 5.37 m, la figura 3.2b muestra el acceso secundario de la FIET el cual tiene un ancho de 4.23 m.

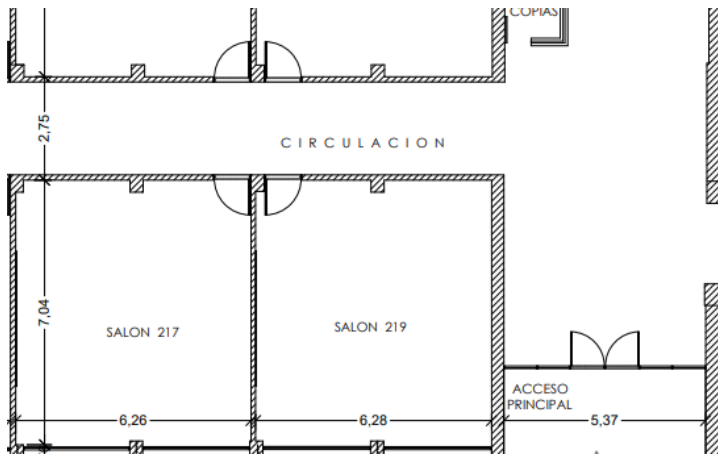


Figura a. Área de circulación y acceso principal.

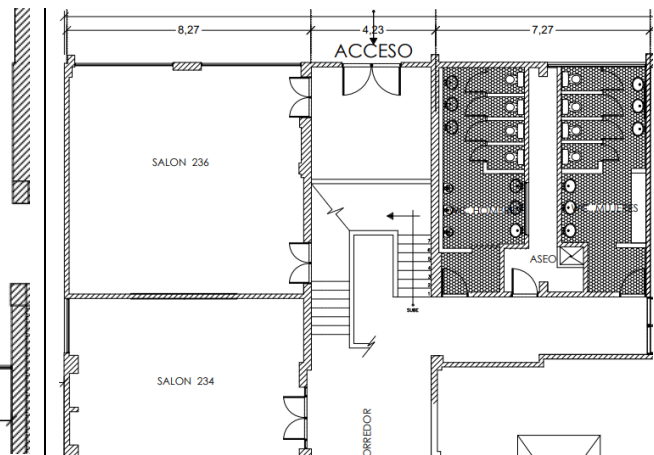


Figura b. Acceso secundario.

Figura 3.2. Área de circulación y accesos de la FIET.

El nivel tres de la FIET con sus medidas generales se muestra en la figura 3.3, donde, eje X tiene 101.94 m y el eje Y 32.69 m, la distribución de sus respectivos espacios se describe en la tabla 3.2.

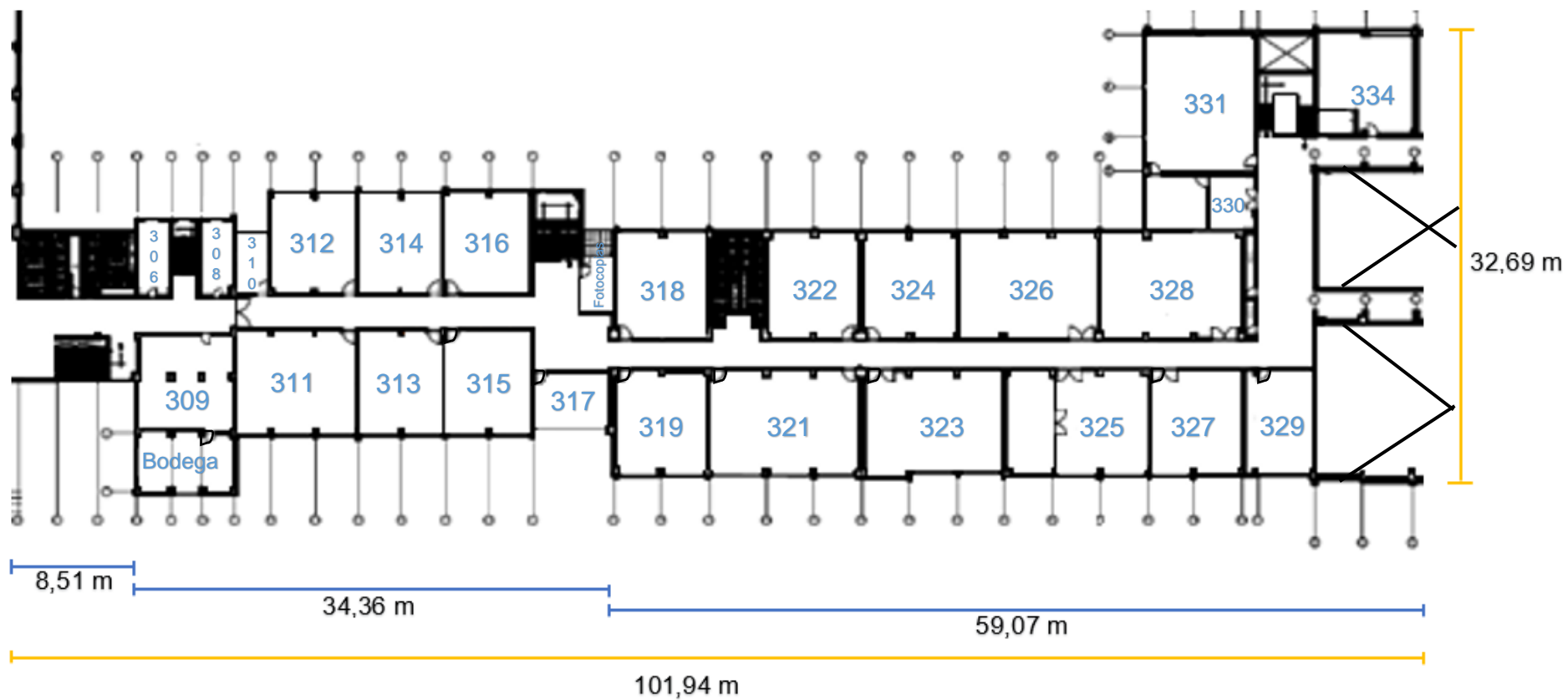


Figura 3.3. Plano tercer nivel del edificio FIET.



EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA INTERIORES EN LA FIET, BASADO EN SIMULACIÓN

<b>Espacio designado</b>	<b>Número</b>
Rama estudiantil IEEE	306
Oficina	308
Laboratorio de Electrónica básica	309
Coordinación Ing. Automática Industrial	310
Sala de sistemas	311, 313
Laboratorio de control de procesos	312
Laboratorio de instrumentación industrial	314
Sala de tesis	315
Sala de proyectos	316
Oficina de profesores	317, 329, 330
Laboratorio de instrumentación	318
Pregrado grupo I+D GNTT	319
Laboratorio de redes	321, 323
Sala 3 telemática	322
Laboratorio de señales	325
Sala 2 telemática	326
Sala de audiovisuales	327
Salón	328
Oficina de profesores	329
Laboratorio de sistemas lógicos	331
Sala 1 telemática	334

**Tabla 3.2. Espacios designados del nivel tres de la FIET.**



### 3.1.2. Edificio FIET en el Simulador

En esta sección se explican las funciones que se modifican en el módulo de planimetría para adaptar los niveles dos y tres de la FIET.

#### 3.1.2.1. Adaptación de Dimensiones

Los planos se ajustan al simulador con escalas reales, para el nivel dos las dimensiones que se determinaron se muestran en la figura 3.4, para el eje X se fija 101 m y para el eje Y 35 m.

Dimension			
xlim(m)	101	xlim(scale)	1
ylim(m)	35	ylim(scale)	1

Figura 3.4. Dimensiones del nivel dos.

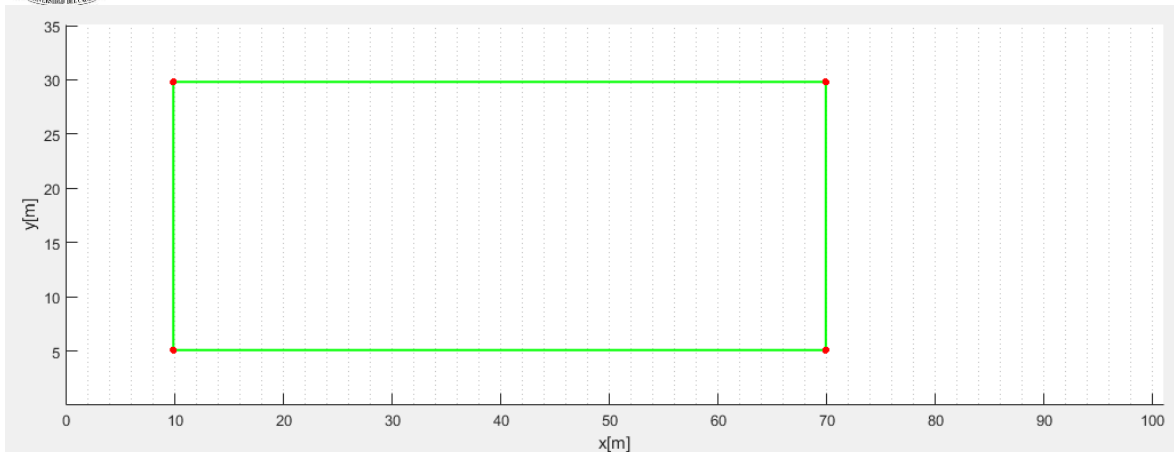
En la figura 3.5 se muestran las dimensiones fijadas para el nivel tres del edificio FIET, donde, el eje X tiene 102 m y el eje Y 35 m.

Dimension			
xlim(m)	102	xlim(scale)	1
ylim(m)	35	ylim(scale)	1

Figura 3.5. Dimensiones del nivel tres.

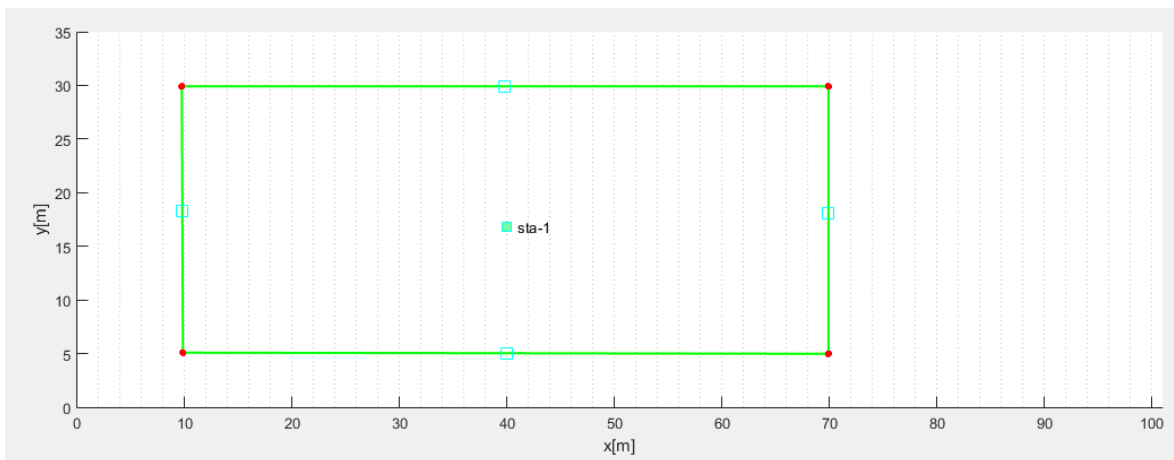
#### 3.1.2.2. Elementos para Planimetría

Se agregan los nodos que están representados por círculos rojos, estos permiten la instalación de paredes, dado que con dos nodos se crea una pared, la figura 3.6 muestra cuatro nodos con sus respectivas paredes que están representadas por las líneas verdes.



**Figura 3.6. Representación en la herramienta de Nodos y paredes.**

Las puertas están representadas por cuadrados vacíos azules aguamarina, estas actúan como abiertas en la simulación permitiendo la libre movilización, las escaleras están simbolizadas por un cuadro azul aguamarina con el nombre de sta-n, donde n es el número de escaleras que hay en un edificio. La figura 3.7 muestra cuatro puertas situadas en la mitad de cada pared y una escalera sta-1 ubicada en el centro del rectángulo. Cabe resaltar que se tiene la posibilidad de agregar elevadores, pero no existen en la FIET.



**Figura 3.7. Representación en la herramienta de Puertas y Escaleras.**

### 3.1.2.3. Ubicación de Estaciones Base

Las BS se encargan de captar las señales transmitidas desde la MS y enviarlas al algoritmo de posicionamiento, pueden ser ubicados en cualquier lugar de la planimetría, pero en la mayoría de las implementaciones la pared es el sitio adecuado para instalarlos. En la herramienta están representados por una estrella con el nombre Lm-n, siendo m es el número de nivel y n es el número de BS por nivel, en la figura 3.8 se muestra un ejemplo instalando cinco BS, donde, L01 está sobre la pared, L02 sobre las escaleras, L03 sobre una puerta, L04 en un espacio libre y L05 sobre un nodo.



Cabe mencionar que las BS pueden ser ubicados en cuantos niveles se desee, dado que es posible colocar un número indefinido tanto de niveles como de BS, para realizar una simulación es necesario al menos una BS instalada.

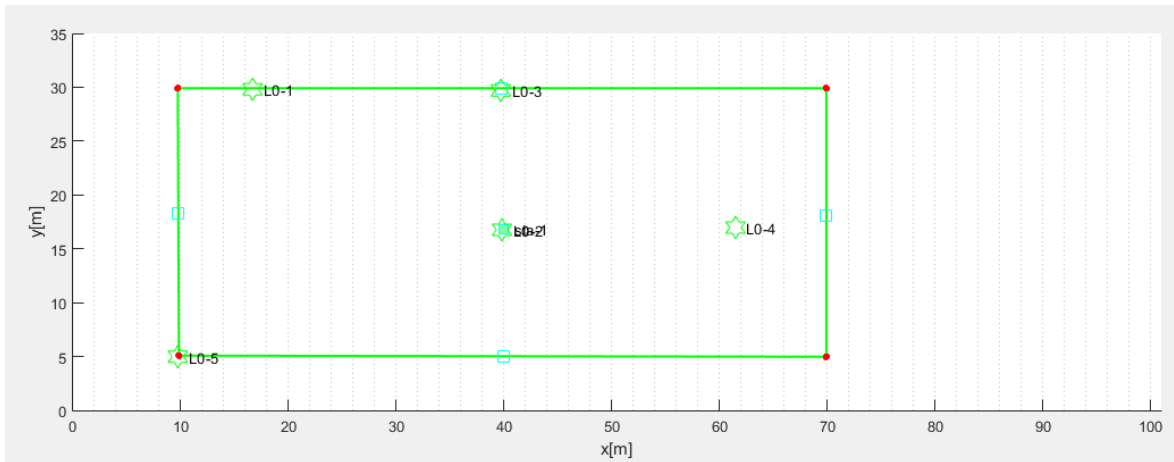


Figura 3.8. Distribución de BS.

La figura 3.9 y 3.10 muestra la implementación de los niveles dos y tres de la FIET en el simulador respectivamente con la distribución de sus espacios de interiores con puertas, escaleras, paredes y dimensiones acorde a las medidas de la facultad.

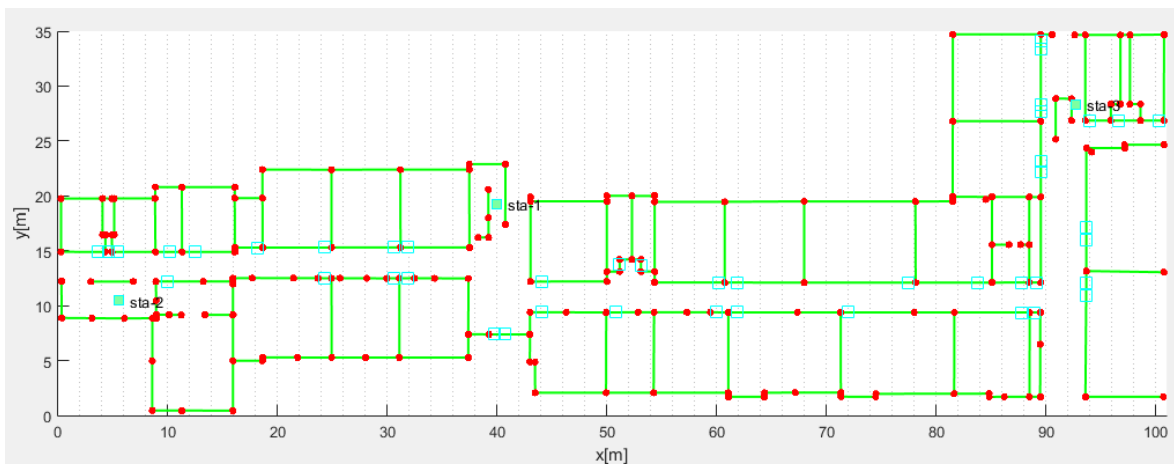


Figura 3.9. Segundo Nivel FIET.

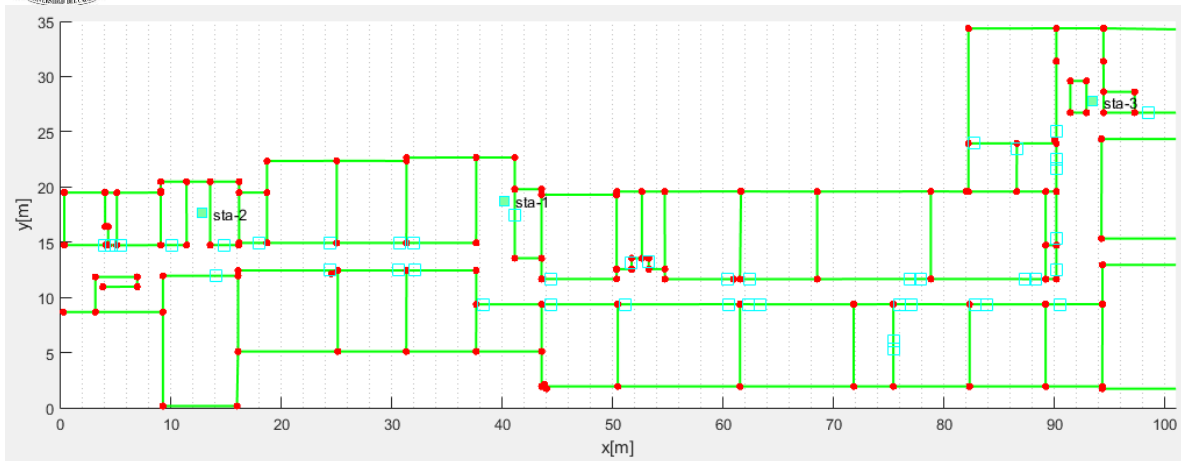


Figura 3.10. Tercer Nivel FIET.

### 3.1.3. Trayectorias

Para iniciar la implementación de una trayectoria, se selecciona algún punto en el espacio de la planimetría de los niveles de la FIET diferente de las paredes, luego se fijan puntos que tengan línea de vista entre sí, o que atraviesen una puerta, la traza de dos puntos está representada por flechas negras, en la figura 3.11 se muestra un ejemplo de una trayectoria generada, donde, inicia desde el acceso principal de norte a sur, avanza 8 m al sur con ángulo  $0^\circ$ , luego gira  $90^\circ$  al oriente y recorre 9 m con  $0^\circ$ , finalmente, gira  $90^\circ$  al sur y recorre 3.5 m con  $0^\circ$ .

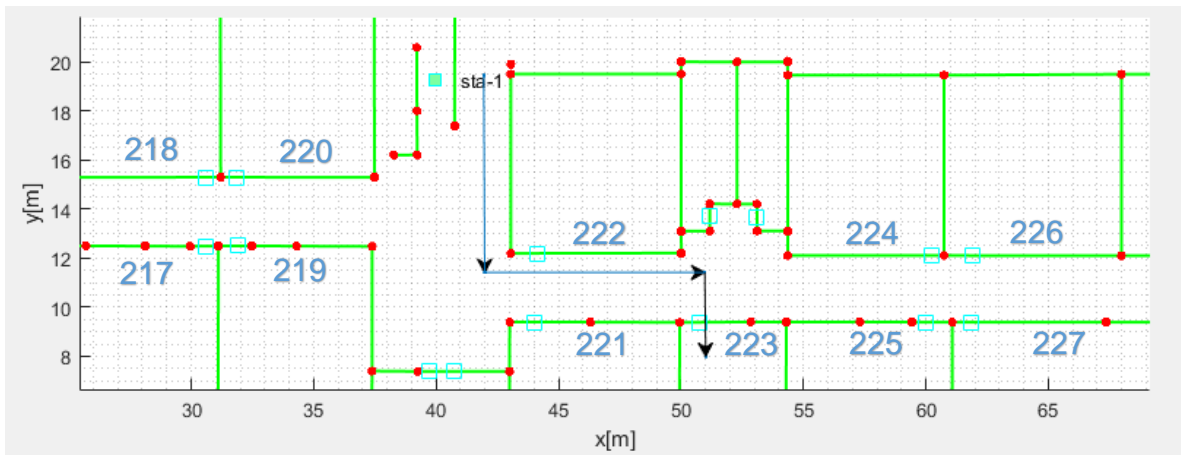


Figura 3.11. Ejemplo Trayectoria.

Las trayectorias también pueden implementarse sobre varios niveles, siempre y cuando se hayan instalado escaleras en dichos niveles. Las figuras 3.12 y 3.13 muestran un ejemplo de una trayectoria sobre dos niveles, donde, inicia en el acceso principal de sur a norte del nivel dos, recorre 10 m al norte con  $0^\circ$  y sube las escaleras, en el nivel tres continua la trayectoria, avanzando 6 m al sur con ángulo  $0^\circ$  para finalizar.



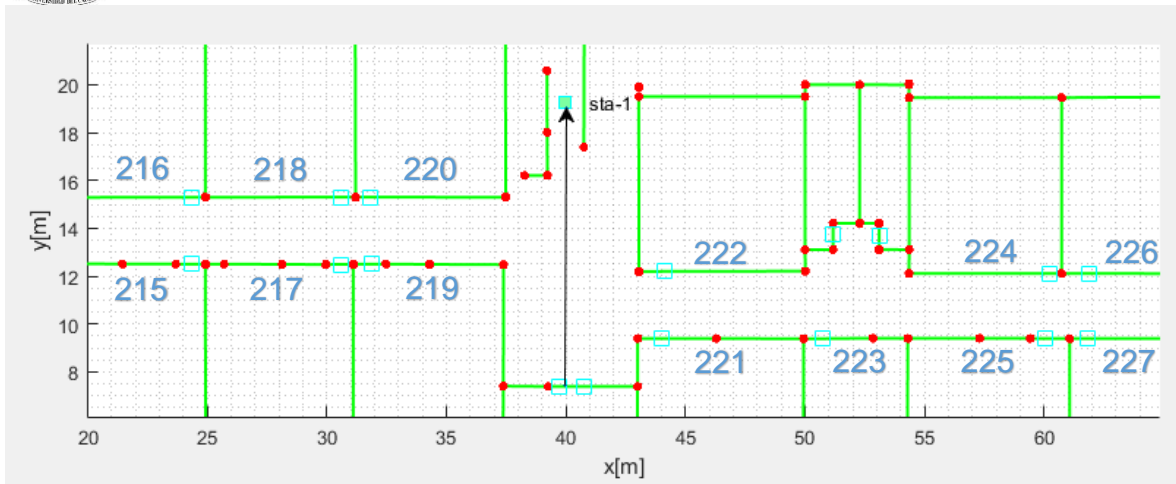


Figura 3.12. Trayectoria sobre nivel dos.

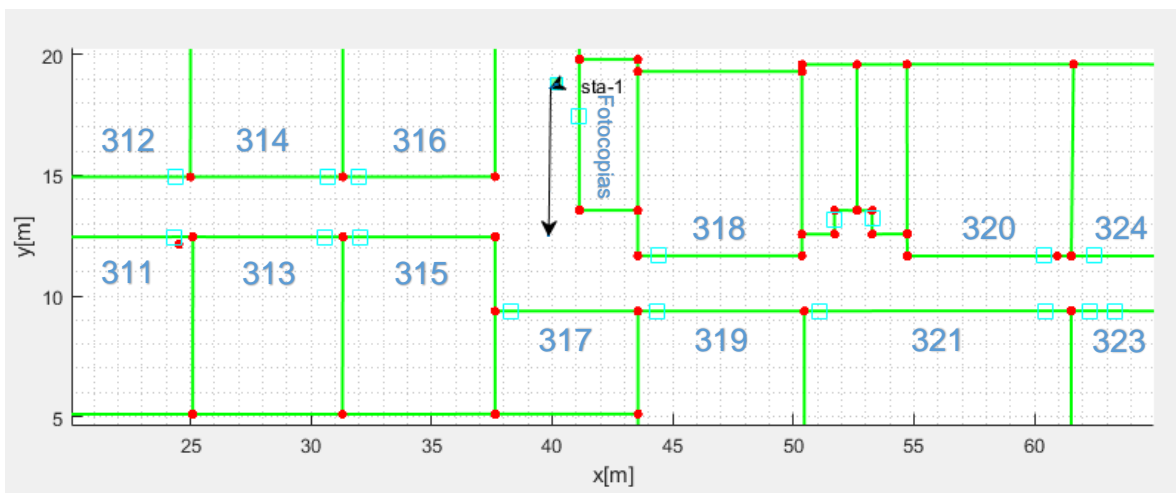


Figura 3.13. Trayectoria sobre nivel tres.

### 3.1.4. Señales de Atenuación

En esta etapa el objetivo es generar señales que describan el comportamiento de la trayectoria. Para trayectorias sobre un nivel, el parámetro de señal definido es RSS el cual origina las señales de atenuación con el algoritmo RSS implementado en la herramienta. RSS no tiene un modelo de propagación definido para interiores, por lo tanto, en este trabajo se modifica el algoritmo, agregando el modelo de pérdidas log-normal shadowing con los valores definidos en la etapa de diseño. Si la trayectoria se realiza sobre dos niveles se adiciona el barómetro que permite detectar variaciones considerables de presión cuando ha ocurrido un cambio de nivel.

Las figuras 3.14 y 3.15 muestran un ejemplo de las señales RSS y barómetro respectivamente, aplicando el modelo de pérdidas mencionado, se agregaron seis BS las cuales originaron las señales L0AP1, L0AP2, L0AP3, L0AP4, L0AP5 y L0AP6, dado que según el número de BS empleadas en la planimetría es el número de señales de atenuación RSS generadas.

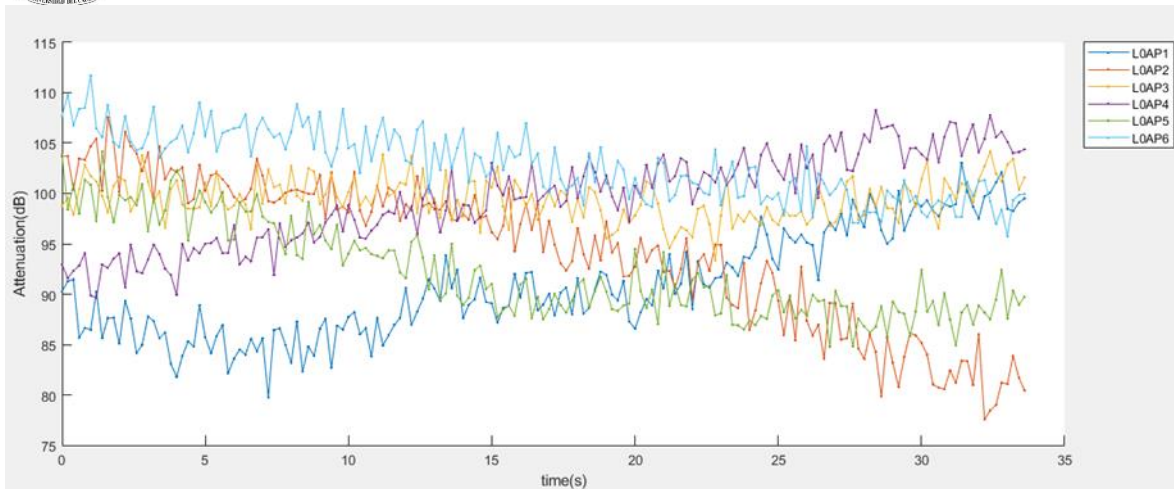


Figura 3.14. Atenuación (dB) vs Tiempo (segundos).

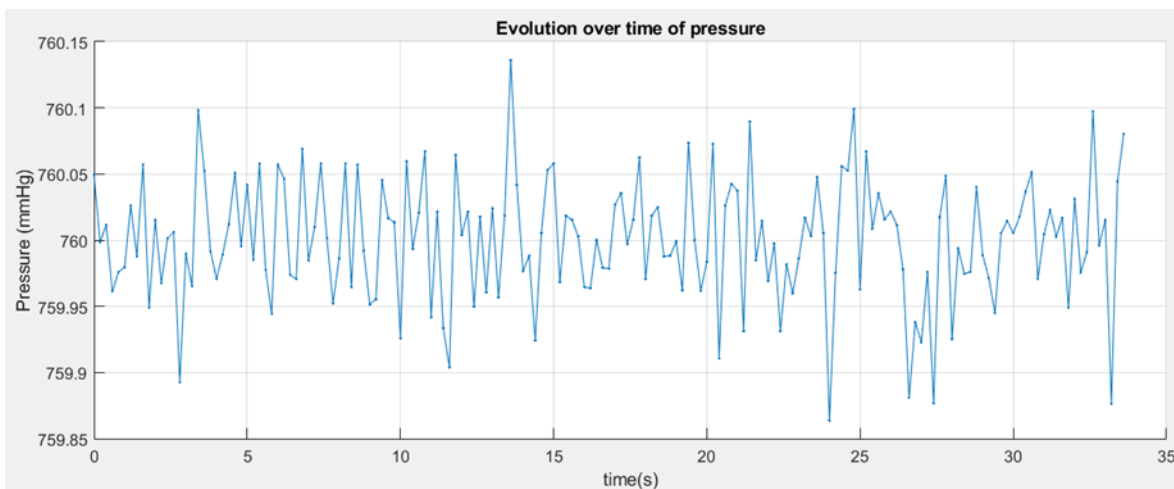


Figura 3.15. Presión (mmHg) vs Tiempo (segundos).

### 3.1.5. Algoritmos de posicionamiento

Con la información suministrada por las BS acerca de las señales previamente generadas, se realiza la estimación del IPS aplicando los algoritmos que se muestran en la figura 3.16, donde todos utilizan el parámetro RSS para realizar la estimación, existen algoritmos diseñados para dos y tres dimensiones. A continuación, se describe cada uno.

#### A. Algoritmos para dos dimensiones

Se utilizan para estimar trayectorias sobre un nivel, existen dos tipos: EKF 2D y UKF 2D. El primero utiliza el EKF y el segundo usa el UKF.

#### B. Algoritmos para tres dimensiones

Estiman trayectorias sobre varios niveles, utilizan el RSS y el barómetro. Existen dos tipos: EKF 3D y UKF 3D, al igual que los algoritmos de dos dimensiones, el primero utiliza el EKF y el segundo usa el UKF.

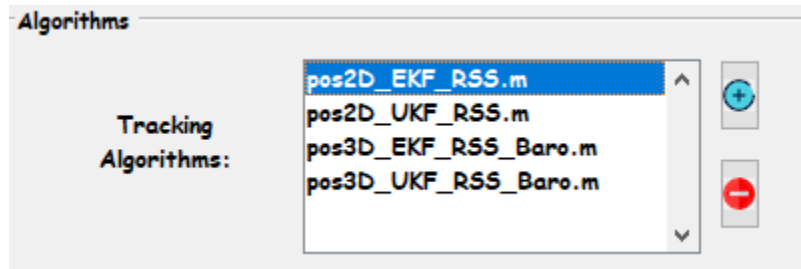


Figura 3.16. Algoritmos de posicionamiento.

La figura 3.17 muestra un ejemplo de estimación representada por las líneas de color negro, para generarla se utiliza el algoritmo EKF 2D, seis BS instaladas en los salones 228, 229, 230, 231, fotocopiadora y pasillo secundario, una frecuencia de muestreo de 5 Hz y una trayectoria ilustrada por la línea azul aguamarina.

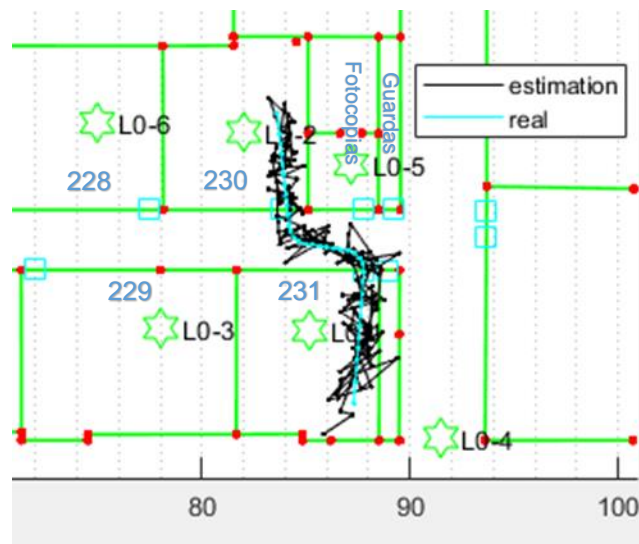


Figura 3.17. Ejemplo de estimación.

### 3.1.6. Gráficas de evaluación

Esta sección tiene como objetivo evaluar el desempeño del IPS mediante dos gráficas, la primera indica la PDF de los datos de error que se producen en la trayectoria entre la posición real del usuario y la estimada, la segunda muestra la CDF de los datos mencionados, estas gráficas fueron desarrolladas en Matlab®, dado que las gráficas de la herramienta no son útiles para el parámetro de evaluación de este trabajo de grado.

En cada periodo de muestreo se origina un dato de error, aplicando la ecuación de la distancia entre dos puntos (distancia euclidiana), este valor es calculado a partir de la ecuación (3.1) [54].

$$DE = \sqrt{(x_t - x_e)^2 + (y_t - y_e)^2}, \quad (3.1)$$

donde  $DE$  es el dato de error,  $(x_e, y_e)$  son las coordenadas de la posición estimada y  $(x_t, y_t)$  son las coordenadas de la posición real.



## 4. CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO

### 4.1. Introducción

Este capítulo tiene como objetivo evaluar el IPS del edificio FIET, se definieron dos escenarios para realizar pruebas de calibración y funcionamiento. Se utiliza el parámetro precisión, empleando la desviación estándar la cual permite analizar la dispersión de los datos de error que se producen en la trayectoria entre la posición real del usuario y la estimada.

### 4.2. Escenario 1

Se considera el nivel dos del edificio FIET, en este se realizan tres pruebas de calibración y una de funcionamiento para determinar los elementos y configuraciones que generen la mejor precisión del sistema.

#### A. Pruebas de Calibración

En estas pruebas se selecciona el número de BS, la frecuencia de muestreo y la distribución de probabilidad que brinden el mejor desempeño al sistema. Se muestra la tabla 4.1 con los parámetros fijos, empleando los algoritmos de 2D.

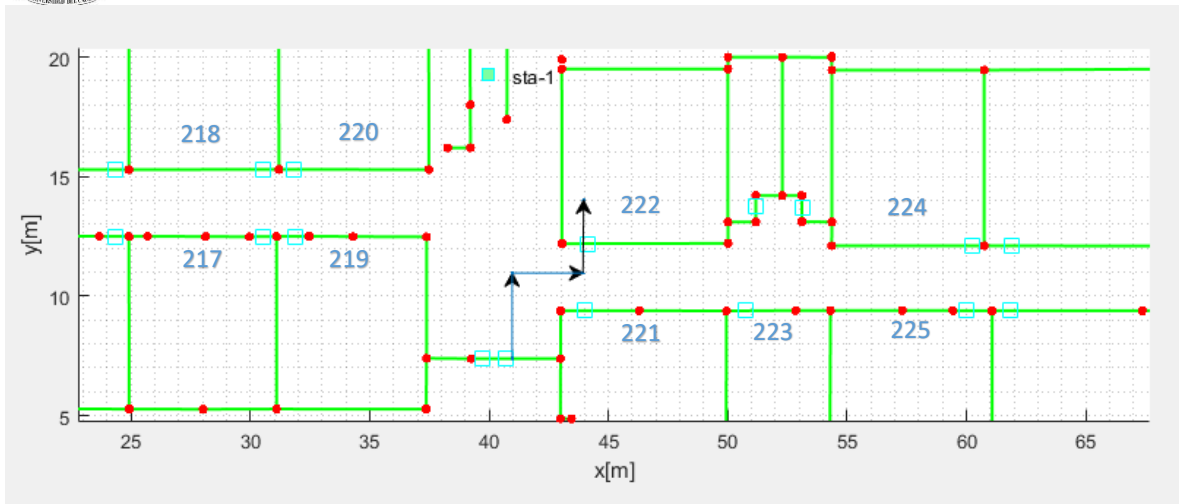
Parámetros	Valor
Nivel	#2
Parámetro de Señal	RSS
Algoritmo	EKF 2D y UKF 2D

Tabla 4.1. Parámetros fijos de escenario uno.

- **Prueba de calibración No. 1: Selección de número de BS.**

En esta prueba se determina la precisión del sistema conforme se aumenta el número de BS, se inicia con 4 y se incrementan en 2 sobre el nivel, hasta establecer un número de BS que brinde una precisión aceptable (menor a 0.5 m) [55][56]. Se aplica una frecuencia de 10 Hz y se utiliza la distribución Weibull para determinar la PDF y CDF de los datos, dado que actualmente esta distribución es la más común en sistemas inalámbricos que generan datos asimétricos positivos [57][58][59]. Cabe resaltar que más adelante se realiza una prueba de calibración para determinar la distribución de probabilidad adecuada para este escenario.

La trayectoria definida se muestra en la figura 4.1, donde, inicia desde el acceso principal de sur a norte del edificio FIET, avanza al norte 3,5 m con 0°, luego gira al oriente 90° y recorre 3 m con 0°, finalmente, gira al norte 90° para recorrer 3 m con 0° y situarse en el salón 222.



**Figura 4.1. Trayectoria para escenario uno.**

Se realizan dos tipos de distribución de BS, en la primera se determina el número que brinde la precisión mencionada, pero sin considerar la trayectoria. En la segunda se instalan las BS teniendo en cuenta la ubicación de la trayectoria.

- Distribución de Estaciones Base tipo uno

Para esta distribución se instalan los BS sin considerar la ubicación de la trayectoria, el número determinado para obtener una precisión menor a 0.5 m con la trayectoria definida en la figura 4.1, fue 70. El espacio donde se encuentran las BS se muestra en la tabla 4.2 y en la figura 4.2 se observa la ubicación exacta.

Estaciones Base	Ubicación
L0-1, L0-38	Baño hombres occidental
L0-2, L0-37	Baño mujeres occidental
L0-3, L0-36	Salón 213
L0-4, L0-35	Salón 212
L0-5, L0-34	Salón 214
L0-6, L0-33	Salón 216
L0-7, L0-32	Salón 218
L0-8, L0-31	Salón 220
L0-9	Escaleras acceso principal
L0-10, L0-44, L0-69	Accesos principales
L0-11, L0-30	Salón 222
L0-12, L0-29	Baño hombres central
L0-13, L0-28	Baño mujeres central
L0-14, L0-27	Salón 224



EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA INTERIORES EN LA FIET, BASADO EN SIMULACIÓN

L0-5, L0-26	Salón 226
L0-16, L0-25	Salón 228
L0-17, L0-24	Salón 230
L0-18, L0-23	Fotocopias 232
L0-19, L0-22	Salón 234
L0-20, L0-21	Salón 236
L0-39	Escaleras Occidentales
L0-40, L0-60	Salón 211
L0-41, L0-59	Salón 215
L0-42, L0-58	Salón 217
L0-43, L0-57	Salón 219
L0-45, L0-56	Salón 221
L0-46, L0-55	Bodega 223
L0-47, L0-54	Salón 225
L0-48, L0-53	Salón 227
L0-49, L0-52	Salón 229
L0-50, L0-51	Salón 231
L0-61, L0-64	Baño hombres oriental
L0-62, L0-63	Baño mujeres oriental
L0-65, L0-66	Accesos secundarios
L0-67, L0-68	Pasillo acceso secundario
L0-70	Salón de Guardas

**Tabla 4.2. Ubicación BS tipo uno del escenario uno.**

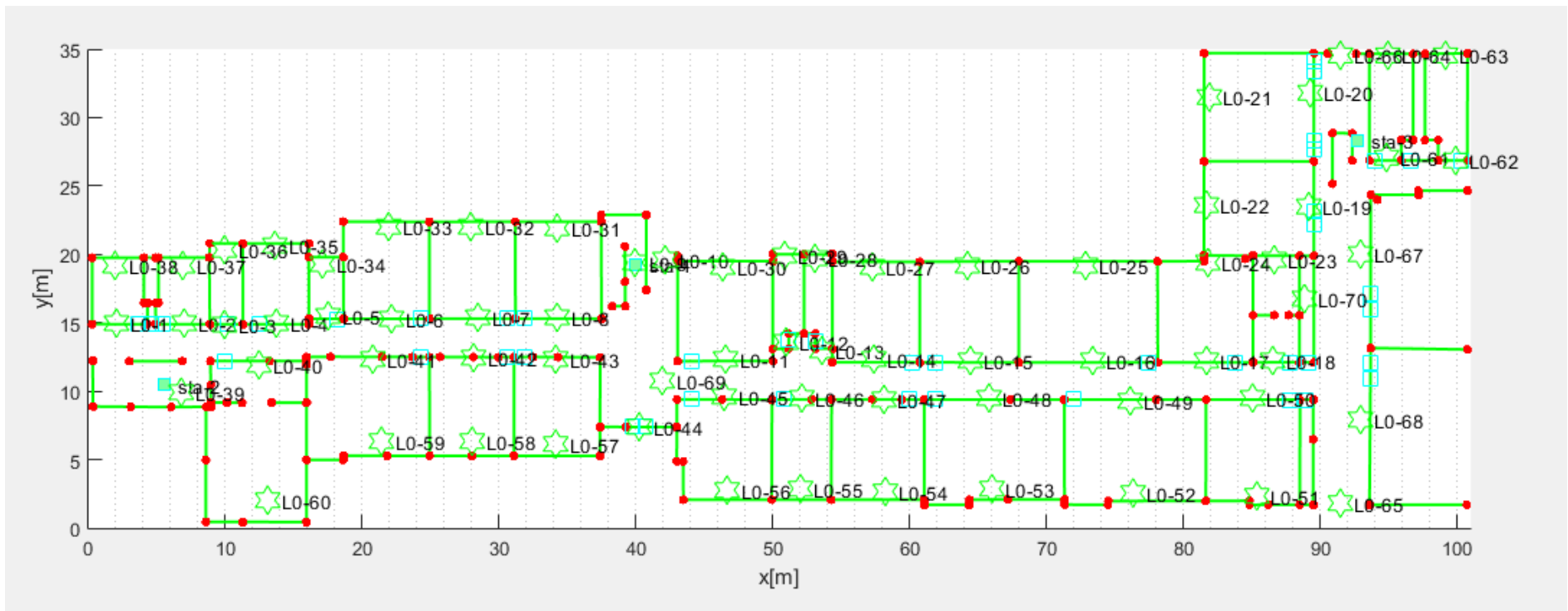


Figura 4.2. Distribución de BS para escenario uno.



La figura 4.3 representa las señales de atenuación generadas durante la trayectoria entre el objetivo (MS) y las BS, como se observa la mayoría de las BS captan la señal con un rango de atenuación de 90 a 125 dB. La tabla 4.3 despliega los rangos de señal con menor atenuación, estos corresponden a las BS más cercanos de la trayectoria, dado que tanto el modelo de pérdidas aplicado para este IPS como todos los modelos, consideran la distancia como uno de los factores que producen la mayor atenuación en un sistema de comunicación inalámbrico.

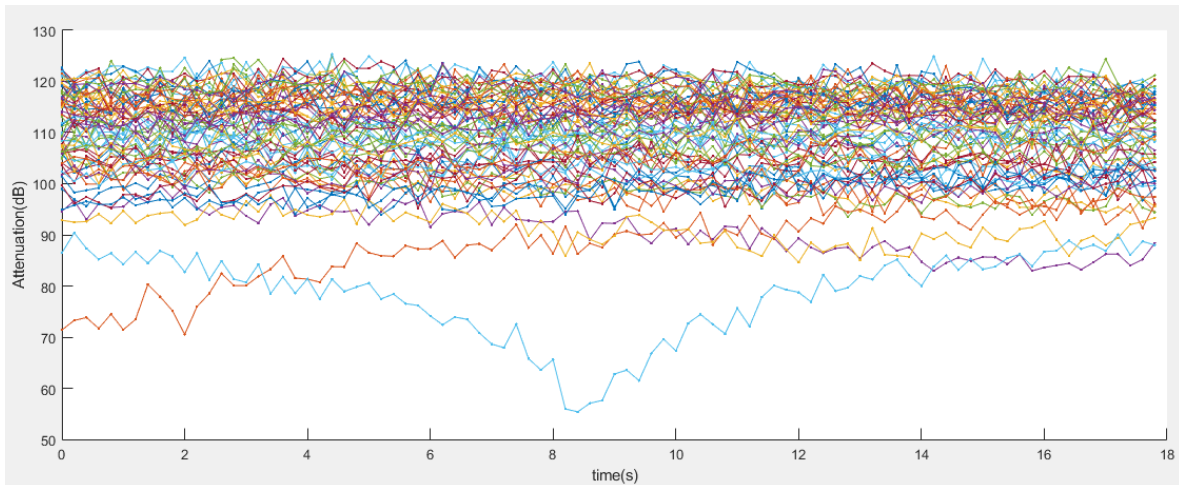


Figura 4.3. Señales de atenuación para escenario uno.

Estaciones Base	Atenuación menor (dB)	Atenuación mayor (dB)
L0-44	65	100
L0-45	80	100
L0-69	58	92
L0-46	83	102

Tabla 4.3. Atenuaciones de la señal transmitida.

La estimación generada por el algoritmo EKF 2D se muestra en la figura 4.4, se observa que realiza una estimación cercana a la trayectoria, pero no precisa, debido al ruido del proceso y medición explicados en el capítulo 1, los cuales son constantes en el funcionamiento del EKF del simulador.



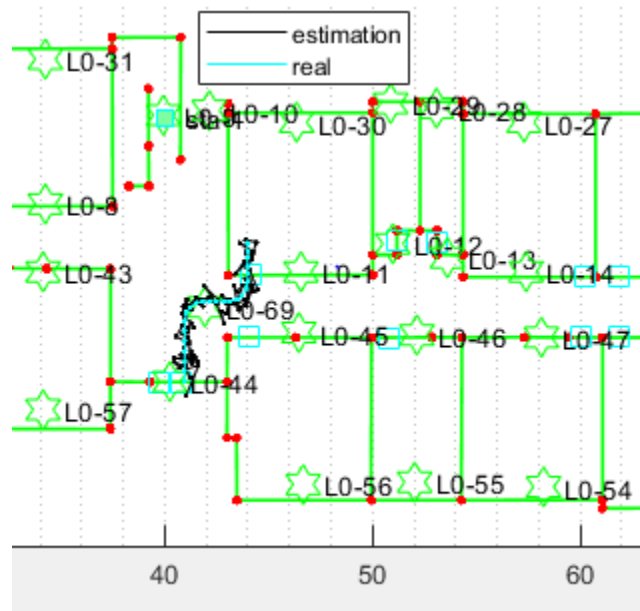


Figura 4.4. Estimación utilizando algoritmo EKF 2D.

La figura 4.5 muestra la PDF con la distribución Weibull del algoritmo, donde se obtiene una precisión de 0.20 m, cumpliendo con el objetivo de precisión planteado en esta prueba.

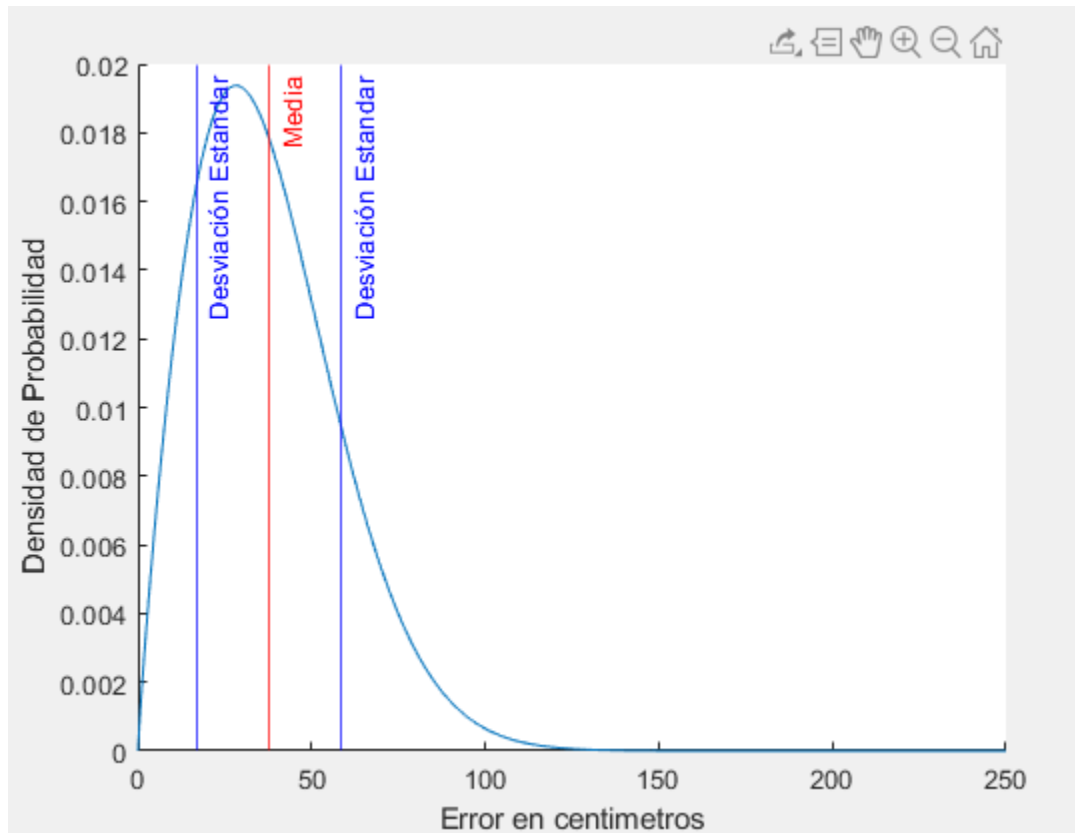
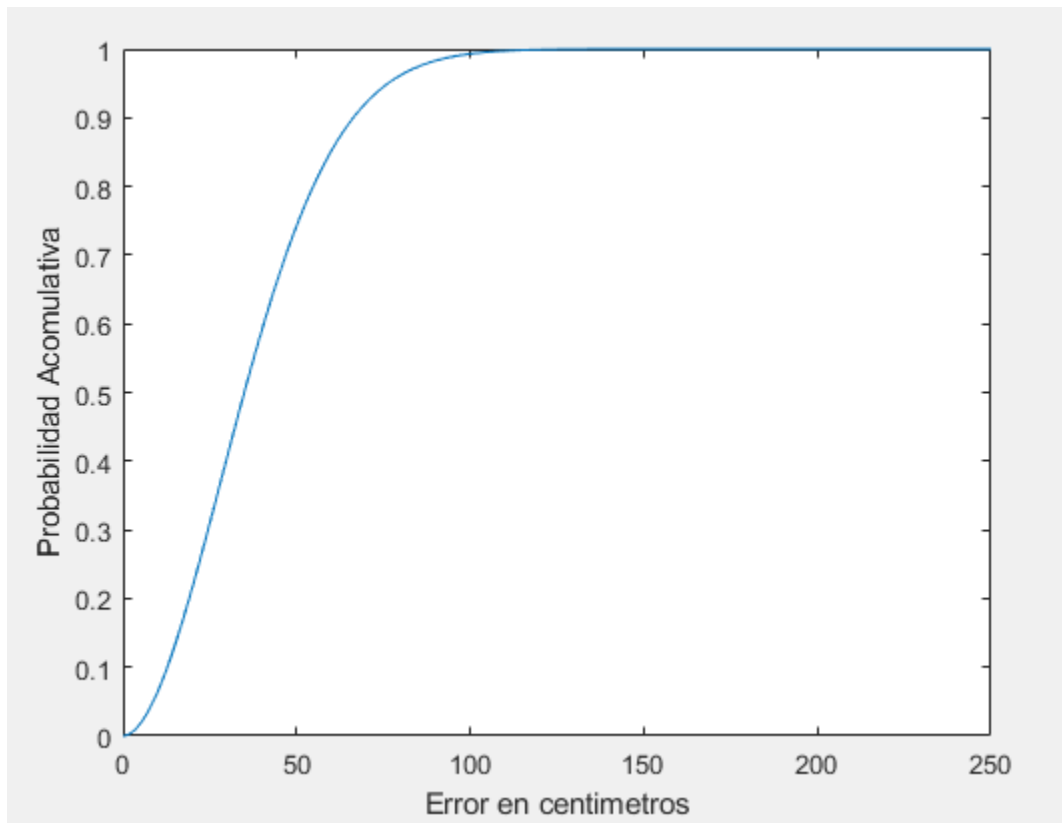


Figura 4.5. PDF con distribución Weibull.



La figura 4.6 muestra la CDF de los datos de error utilizando la distribución Weibull, donde se observa que en el 99% de los casos el error de estimación durante cada periodo de muestreo es menor a 1 metro.



**Figura 4.6. CDF con distribución Weibull.**

La tabla 4.4 muestra una comparativa de los principales cambios de precisión junto con el error máximo de estimación que se generó durante la trayectoria, donde se observa que al aumentar el número de BS no se garantiza que la precisión mejore. Por ejemplo, con 54 y 60 BS la precisión es de 0.24 y 0.27 m respectivamente, obteniendo una mayor precisión con una menor cantidad de BS, también se observa que el error máximo con 34 y 40 BS es de 1.6 y 2 m respectivamente, generando un mayor error con 40.

Lo mencionado anteriormente demuestra que la ubicación de las BS es fundamental en la simulación del IPS, dado que, si se instalan sin tener en cuenta el área de la posible trayectoria, estos no son de utilidad para mejorar la precisión.

Desde la BS 50 hasta la 70, la precisión es menor a 0.3 m, pero se continúan instalando de manera equitativa en cada salón y acceso, con el fin de garantizar una estimación aceptable, no solo para la trayectoria de esta prueba sino para cualquier otra que se trace en este escenario. La tabla completa se muestra en el en la tabla A.1 del apéndice A.



Número de Estaciones Base	Estaciones Base	Error máximo (m)	Precisión (m)
4	L0-1 hasta L0-4	49.8	9.9
10	L0-1 hasta L0-10	6.4	1.1
14	L0-1 hasta L0-16	3.1	0.45
20	L0-1 hasta L0-20	1.5	0.52
24	L0-1 hasta L0-24	1.7	0.48
30	L0-1 hasta L0-30	1.8	0.47
34	L0-1 hasta L0-34	1.6	0.42
40	L0-1 hasta L0-40	2	0.38
44	L0-1 hasta L0-44	1.36	0.30
50	L0-1 hasta L0-50	1.1	0.29
54	L0-1 hasta L0-54	1	0.24
60	L0-1 hasta L0-60	1.05	0.27
64	L0-1 hasta L0-64	1.05	0.25
70	L0-1 hasta L0-70	0.92	0.20

**Tabla 4.4. Precisión y error máximo con distribución de BS tipo uno.**

- Distribución de Estaciones Base tipo dos

En esta distribución se instalan la misma cantidad de BS que la distribución tipo uno, pero la ubicación se realiza desde los extremos del edificio hacia el centro (lugar de la trayectoria). La tabla 4.5 muestra el nombre del espacio y en la figura 4.7 se observa la ubicación.

Estaciones Base	Ubicación
L0-1, L0-40	Baño hombres occidental
L0-3, L0-39	Baño mujeres occidental
L0-9, L0-46	Salón 213
L0-11, L0-48	Salón 212
L0-15, L0-52	Salón 214
L0-17, L0-54	Salón 216
L0-21, L0-58	Salón 218
L0-25, L0-62	Salón 220
L0-27	Escaleras acceso principal
L0-29, L0-31, L0-33	Accesos principales
L0-37, L0-63	Salón 222
L0-39, L0-67	Baño hombres central



EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA INTERIORES EN LA FIET, BASADO EN SIMULACIÓN

L0-38, L0-69	Baño mujeres central
L0-34, L0-66	Salón 224
L0-30, L0-61	Salón 226
L0-26, L0-57	Salón 228
L0-22, L0-53	Salón 230
L0-14, L0-49	Fotocopias 232
L0-10, L0-47	Salón 234
L0-8, L0-45	Salón 236
L0-5	Escaleras Occidentales
L0-07, L0-44	Salón 211
L0-13, L0-50	Salón 215
L0-19, L0-56	Salón 217
L0-23, L0-60	Salón 219
L0-34, L0-65	Salón 221
L0-36, L0-68	Bodega 223
L0-32, L0-64	Salón 225
L0-28, L0-59	Salón 227
L0-24, L0-55	Salón 229
L0-20, L0-51	Salón 231
L0-4, L0-43	Baño hombres oriental
L0-2, L0-41	Baño mujeres oriental
L0-6, L0-16	Accesos secundarios
L0-18, L0-70	Pasillo acceso secundario
L0-12	Salón de Guardas

**Tabla 4.5. Ubicación de BS tipo dos.**

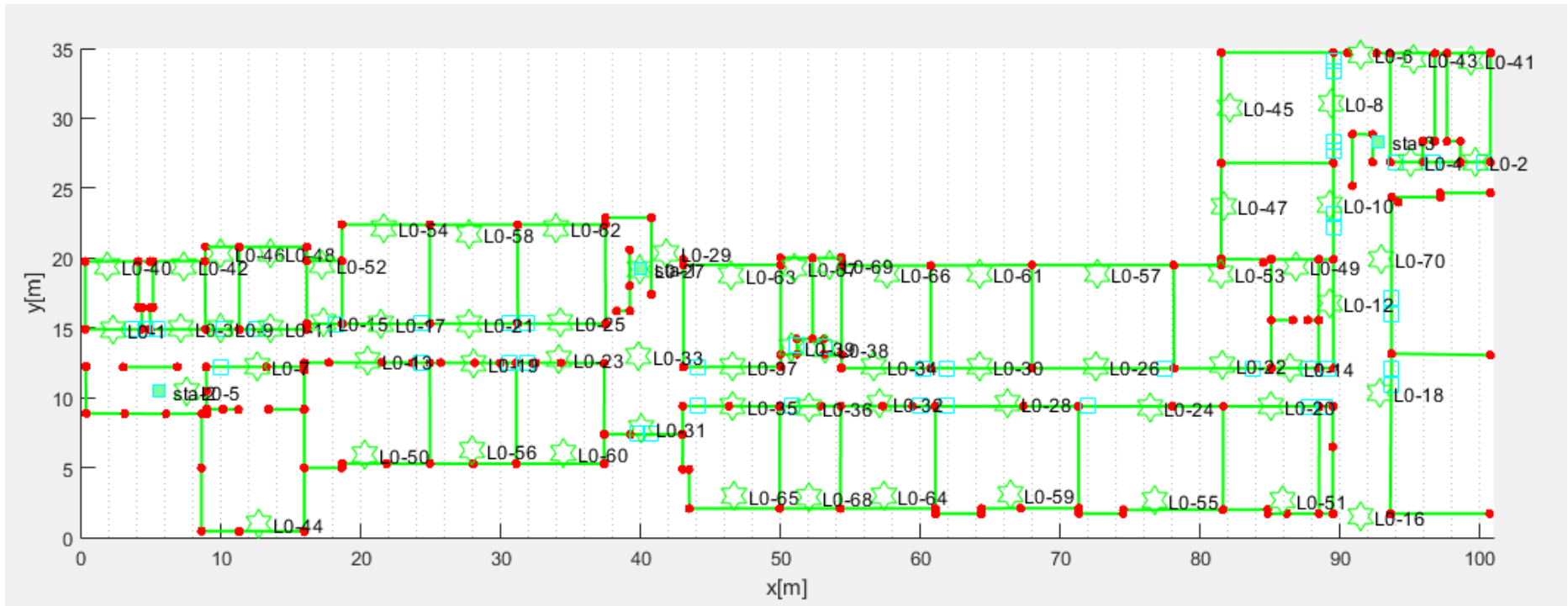


Figura 4.7. Distribución de BS tipo dos.



La tabla 4.6 muestra las principales variaciones de precisión y error máximo de estimación para esta distribución, donde, a partir de la BS número 40 en adelante la precisión es menor a 0.3 m, ya que se instalaron las BS teniendo presente la trayectoria creada, instalándolos con distancias similares en ambos sentidos (oriente y occidente) respecto a la trayectoria. El error máximo de estimación disminuye considerablemente a medida que se aumentan las BS hasta el número 40, a partir de la BS 40 hasta la 70 el error en algunos casos aumenta, debido a la instalación en lugares alejados de la trayectoria para cumplir con el número determinado en la distribución tipo uno. La tabla completa se encuentra en la tabla A.2 del apéndice A.

El número y la ubicación de BS son aspectos fundamentales para lograr una estimación con una precisión adecuada, dado que al comparar la misma cantidad de BS instaladas en las dos distribuciones y usando el mismo algoritmo, la precisión en la estimación es diferente.

La ubicación de las 70 BS en las dos distribuciones es similar, pero el resultado de precisión en la estimación es diferente, debido a que la generación de señales tiene variaciones causadas por el modelo de propagación aplicado, el cual representa el desvanecimiento en el edificio FIET mediante una variable aleatoria con media cero y desviación estándar de 3.2 dB, generando un valor al azar que está en el rango de -3.2 hasta 3.2.

Número de Estaciones Base	Estaciones Base	Error máximo (m)	Precisión (m)
4	L0-1 hasta L0-4	37.5	8.9
10	L0-1 hasta L0-10	26	7.58
14	L0-1 hasta L0-14	15	5.01
20	L0-1 hasta L0-20	13.6	3.5
24	L0-1 hasta L0-24	10.5	2.73
30	L0-1 hasta L0-30	2.5	0.59
34	L0-1 hasta L0-34	1.9	0.38
40	L0-1 hasta L0-40	1.25	0.26
44	L0-1 hasta L0-44	0.95	0.28
50	L0-1 hasta L0-50	0.8	0.28
54	L0-1 hasta L0-54	1.03	0.26
60	L0-1 hasta L0-60	1.18	0.27
64	L0-1 hasta L0-64	1.4	0.25
70	L0-1 hasta L0-70	1.09	0.23

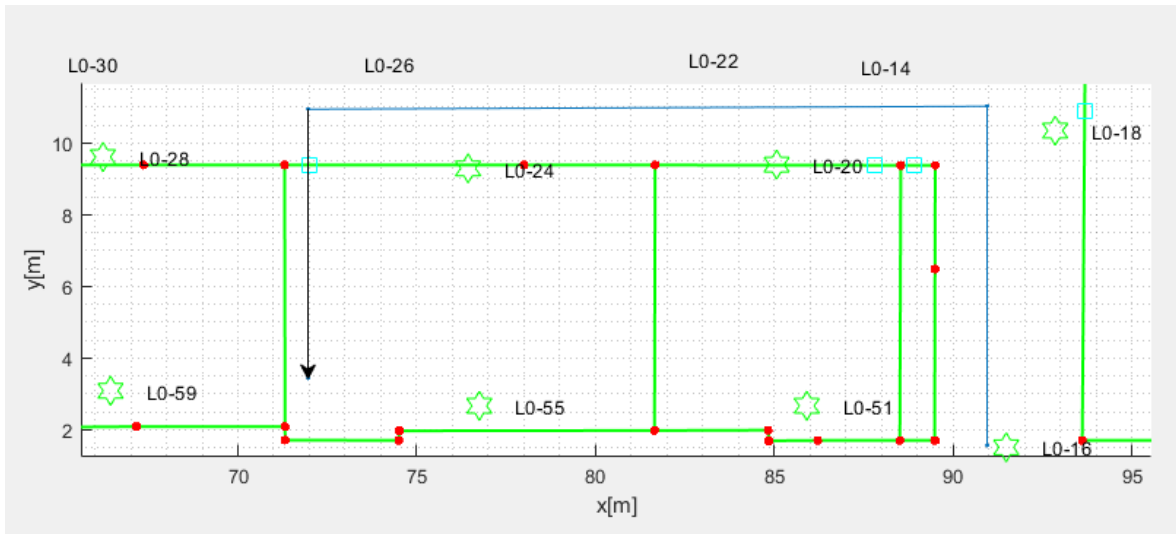
Tabla 4.6. Precisión y error máximo de estimación con distribución tipo dos.



- **Prueba de calibración No. 2: Elección de frecuencia de muestreo**

Con el número y la distribución de BS definidos, se busca determinar la frecuencia de muestreo que genere la mayor precisión en este escenario, se emplean los algoritmos de posicionamiento de 2D, EKF y UKF. Los rangos de frecuencia definidos son desde 1Hz hasta 10 Hz en intervalos de 0.5 Hz, si se aplica una frecuencia alta (mayor a 10 Hz) el sistema debe realizar una gran cantidad de cálculos matemáticos y el dispositivo de con el que se realizan las pruebas tiene limitaciones de capacidad de memoria y procesamiento<sup>3</sup>.

La trayectoria se muestra en la figura 4.8, inicia en el acceso secundario de sur a norte y recorre 9.5 m con 0°, gira 90° al occidente y avanza 19 m con 0°, luego gira 90° al sur y finalmente recorre 7.5 m para situarse sobre el salón 229, recorriendo un total de 36 m.



**Figura 4.8. Trayectoria sobre un nivel.**

La frecuencia de muestreo está dada por la ecuación (4.1) y se encarga de dividir la trayectoria en  $n$  puntos que representan los estados a estimar, es decir, en cada periodo se tiene un punto al cual se le aplica el algoritmo de posicionamiento.

$$T = \frac{1}{\text{Frecuencia}}, \quad (4.1)$$

La tabla 4.7 presenta la precisión y error máximo de estimación con los rangos de frecuencia definidos. Los dos algoritmos tienen una precisión menor a 0.5 m en todos los rangos, donde la mejor precisión y el menor error se obtienen con 7 Hz, utilizando el algoritmo EKF 2D, esta frecuencia es la seleccionada para las pruebas de funcionamiento que se realizan posteriormente.

<sup>3</sup> Las limitaciones del computador con el cual se desarrolló el trabajo de grado son el procesador intel(r) core(tm) i3-1005g1 con una memoria RAM de 4 GB.



Frecuencia (Hz)	Error máximo con EKF 2D (m)	Error máximo con UKF 2D (m)	Precisión con EKF 2D (m)	Precisión con UKF 2D (m)
1	1.42	1.4	0.34	0.42
1.5	2.25	2.05	0.29	0.32
2	2	1.7	0.30	0.32
2.5	1.48	1.61	0.30	0.33
3	1.45	1.55	0.28	0.33
3.5	1.44	1.82	0.27	0.33
4	1.45	1.45	0.28	0.31
4.5	1.18	1.38	0.27	0.30
5	1.35	1.45	0.29	0.31
5.5	1.68	1.7	0.28	0.30
6	1.52	1.61	0.25	0.30
6.5	1.11	1.22	0.28	0.32
7	0.9	1.32	0.28	0.31
7.5	1.21	1.32	0.29	0.32
8	0.98	1.55	0.28	0.31
8.5	1.21	1.68	0.30	0.33
9	1.3	1.71	0.30	0.33
9.5	1	2.8	0.29	0.32
10	1.38	1.70	0.28	0.33

Tabla 4.7. Precisión y error máximo de los algoritmos 2D, variando la frecuencia de muestreo.

- **Prueba de calibración No. 3: Distribución de probabilidad**

Se determina la distribución de probabilidad adecuada para modelar los datos de error, se realizan siete trayectorias diferentes, donde se aplica el test Anderson-Darling (AD) para determinar la distribución de probabilidad que describe de forma más aproximada el comportamiento de los datos de error en las trayectorias, estableciendo dos hipótesis  $H_0$  y  $H_1$  [60]. La primera plantea que los datos siguen una distribución específica y la segunda contradice a  $H_0$ , dictaminando que no siguen dicha distribución. En este caso se establecen estas hipótesis para las distribuciones más comunes las cuales son Normal, Log normal, Exponencial, Weibull y Gamma [61][60].

El test define los parámetros  $P$  y estadístico de AD,  $P$  es la probabilidad que mide la evidencia contra la hipótesis  $H_0$  con base al nivel de significancia<sup>4</sup> (0.05). El estadístico de

<sup>4</sup> El nivel de significancia o alfa ( $\alpha$ ), es un umbral que permite verificar una hipótesis dentro de un estudio, se suele establecer en 0.05 el cual indica un riesgo del 5% de concluir que los datos no siguen una distribución específica, pero es posible usar otros niveles en función del estudio. Cuando el valor  $p$  es inferior a  $\alpha$ , se rechaza la hipótesis  $H_0$ , cabe resaltar que entre más se aproxime  $\alpha$  a 1 mejor es el ajuste a determinada distribución [61][62].





AD mide qué tan bien siguen los datos una distribución en particular, donde mejor se ajuste la distribución a los datos, menor será el estadístico AD [60][61][63].

Con el fin de obtener resultados representativos y confiables, se genera un número de datos de error mayor a 150 en las siete trayectorias, los resultados se muestran en la tabla 4.8, donde la distribución más aproximada es la Weibull para todos los casos, dado que tiene un valor de P mayor a 0.05 en todas las trayectorias y el menor estadístico de AD comparado con las demás distribuciones. También se observa que las distribuciones Normal, Log-normal, Exponencial y Gamma son menores que el nivel de significancia, siendo la hipótesis H0 la correcta para esas distribuciones.

Trayectoria	Algoritmo	Distribución	Número de datos	Estadístico de AD	P
1	EKF 2D	Normal	421	2.841	<0.005
1	EKF 2D	Log normal	421	4.472	<0.005
1	EKF 2D	Exponencial	421	38.847	<0.003
1	EKF 2D	Weibull	421	0.261	>0.250
1	EKF 2D	Gamma	421	1.088	0.009
2	UKF 2D	Normal	311	2.052	<0.005
2	UKF 2D	Log normal	311	4.519	<0.005
2	UKF 2D	Exponencial	311	25.605	<0.003
2	UKF 2D	Weibull	311	0.266	>0.250
2	UKF 2D	Gamma	311	1.200	<0.005
3	EKF 2D	Normal	308	3.338	<0.005
3	EKF 2D	Log normal	308	2.862	<0.005
3	EKF 2D	Exponencial	308	22.914	<0.003
3	EKF 2D	Weibull	308	0.630	0.100
3	EKF 2D	Gamma	308	0.984	0.016
4	UKF 2D	Normal	423	3.321	<0.005
4	UKF 2D	Log normal	423	5.190	<0.005
4	UKF 2D	Exponencial	423	35.691	<0.003
4	UKF 2D	Weibull	423	0.179	>0.250
4	UKF 2D	Gamma	423	1.018	0.013
5	EKF 2D	Normal	431	3.062	<0.005
5	EKF 2D	Log normal	431	6.267	<0.005
5	EKF 2D	Exponencial	431	39.966	<0.003
5	EKF 2D	Weibull	431	0.537	0.187
5	EKF 2D	Gamma	431	1.481	<0.005
6	UKF 2D	Normal	435	3.479	<0.005
6	UKF 2D	Log normal	435	4.949	<0.005
6	UKF 2D	Exponencial	435	38.520	<0.003
6	UKF 2D	Weibull	435	0.201	>0.250



6	UKF 2D	Gamma	435	0.922	0.022
7	EKF 2D	Normal	179	2.026	<0.005
7	EKF 2D	Log normal	179	2.180	<0.005
7	EKF 2D	Exponencial	179	15.673	<0.003
7	EKF 2D	Weibull	179	0.311	>0.250
7	EKF 2D	Gamma	179	0.397	>0.250

Tabla 4.8. Resultado del Test AD para escenario uno.

### B. Pruebas de Funcionamiento

Esta prueba se realiza con el fin de analizar la precisión del sistema utilizando los parámetros que mejor desempeño brindaron en las pruebas de calibración. La tabla 4.9 muestra los parámetros fijos para las pruebas de funcionamiento del escenario No 1.

Parámetros	Valor
<b>Escenario uno</b>	
Algoritmo	EKF 2D y UKF 2D
Parámetro de señal	RSS
Frecuencia (Hz)	7
Distribución de Estaciones Base	Tipo 2
Distribución de probabilidad para datos de error	Weibull

Tabla 4.9. Parámetros fijos para pruebas de funcionamiento.

Se generaron tres trayectorias con diferentes distancias, las cuales se muestran en las figuras 4.9, 4.10 y 4.11. La primera es una trayectoria larga que atraviesa los pasillos del nivel dos, con una longitud de 114.5 m. La segunda se desplaza aproximadamente 77 m, pasando por los salones 215, 216, 217, 219 y 221. Por último, la tercera es una trayectoria corta, la cual se realiza sobre el salón 227, con un recorrido de 27.5 m.

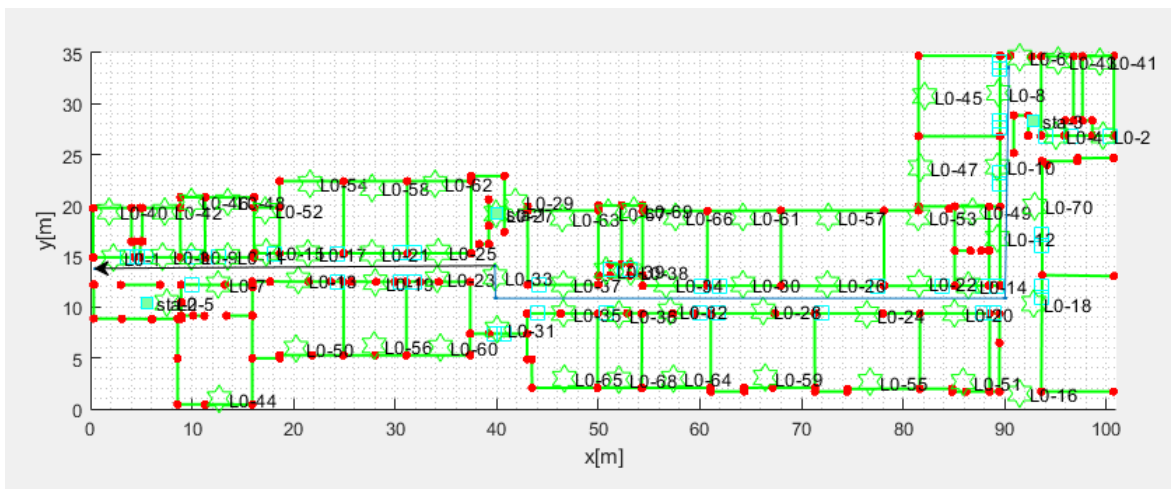


Figura 4.9. Trayectoria uno.

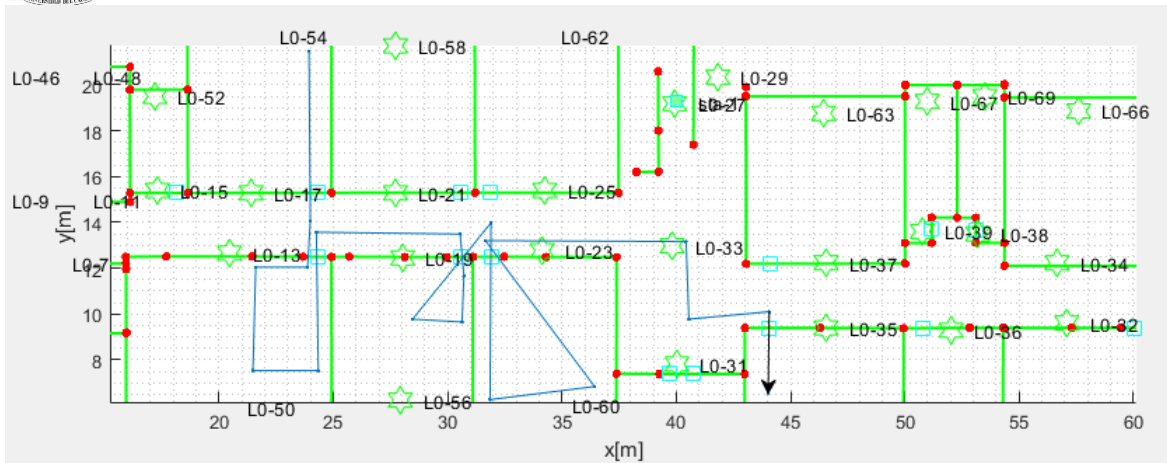


Figura 4.10. Trayectoria dos.

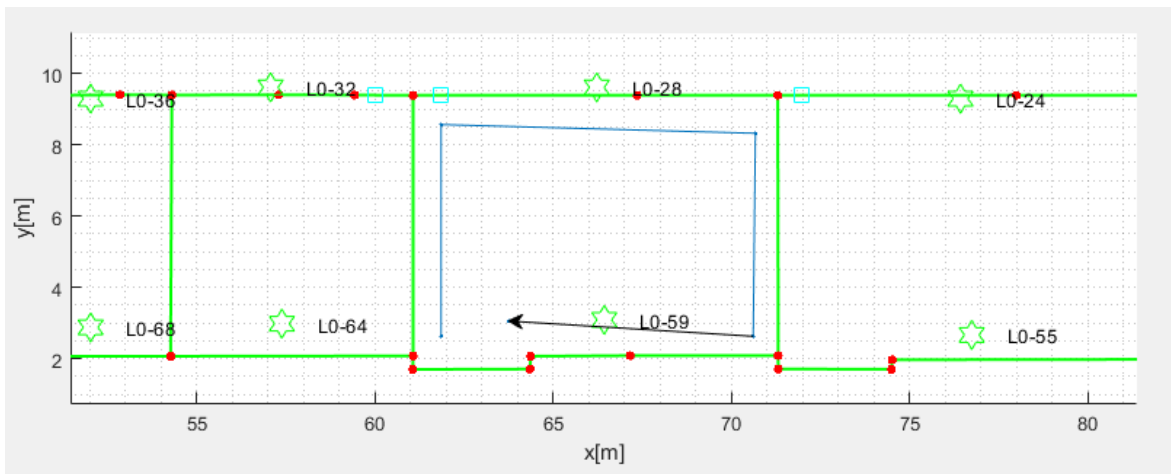


Figura 4.11. Trayectoria tres.

La precisión utilizando los dos algoritmos para las trayectorias 1, 2 y 3 se muestra en la tabla 4.10. Se observa que utilizando el EKF 2D todas las trayectorias tienen una precisión adecuada menor a 0.25 m, de tal forma que con los parámetros y configuraciones determinadas en las pruebas de calibración se garantiza una precisión menor a 0.3 m para cualquier trayectoria del nivel dos del edificio FIET (escenario No 1).

Empleando el UKF 2D en la primera y segunda trayectoria los resultados son desproporcionados, debido a la distancia que recorren las trayectorias las cuales son de 114.5 m y 77 m respectivamente, la tercera es la única que brinda resultados adecuados, concluyendo que este algoritmo de posicionamiento no se debe utilizar en trayectorias con recorridos mayores a 36 m, esta distancia fue la utilizada en la prueba de calibración de frecuencia de muestreo y en todos los rangos tuvo una precisión aceptable.



Trayectoria	Algoritmo	Precisión (m)
1	EKF-2D	0.20
1	UKF-2D	45516
2	EKF-2D	0.23
2	UKF-2D	32912
3	EKF-2D	0.20
3	UKF-2D	0.35

Tabla 4.10. Precisión de las trayectorias sobre un nivel.

### 4.3. Escenario 2

Definido en el nivel 2 y 3 del edificio FIET, se realizan dos pruebas de calibración y una de funcionamiento para determinar las configuraciones que generen una precisión aceptable.

#### A. Pruebas de Calibración

En la tabla 4.11 se muestran los parámetros fijos para las pruebas de calibración, se emplea los algoritmos de tres dimensiones (3D) EKF y UKF, dado que los algoritmos EKF 2D y UKF 2D están diseñados únicamente para trayectorias sobre un nivel.

Parámetros	Valor
Nivel	#2 y #3
Parámetro de señal	RSS y Barómetro
Algoritmos	EKF 3D y UKF 3D

Tabla 4.11. Parámetros fijos de escenario 2.

La figura 4.12 muestra la ubicación de las BS para el nivel tres, se realizó de igual manera que en el nivel dos, empleando la distribución tipo 2 del escenario No 1, dado que el área es igual en los dos niveles. La tabla 4.12 muestra el nombre del espacio donde están ubicados.

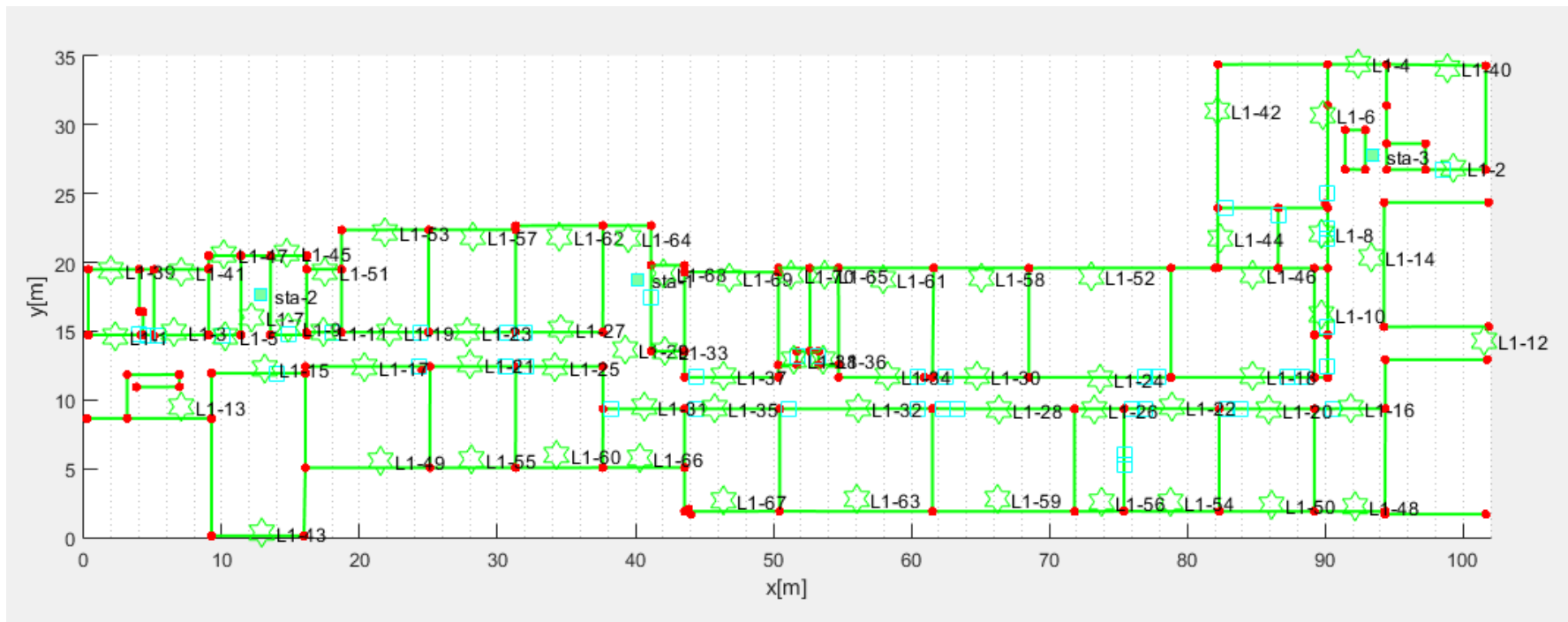


Figura 4.12. Distribución de BS para nivel tres.



EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA INTERIORES EN LA FIET, BASADO EN SIMULACIÓN

<b>Estaciones Base</b>	<b>Ubicación</b>
L1-1, L0-39	Baño hombres occidental
L1-3, L1-41	Baño mujeres occidental
L1-5, L1-47	Rama estudiantil IEEE 306
L1-7	Escaleras occidentales
L1-9, L1-45	Oficina 308
L1-11, L1-51	Coordinación Ing. Automática Industrial 310
L1-19, L1-53	Laboratorio de control de procesos 312
L1-23, L1-57	Laboratorio de instrumentación industrial 314
L1-27, L1-62	Sala de proyectos 316
L1-29, L1-64	Escaleras centrales
L1-33, L1-68	Fotocopias
L1-37, L1-69	Laboratorio de instrumentación 318
L1-38, L1-70	Baño hombres central
L1-36, L1-65	Baño mujeres central
L1-34, L1-61	Sala 3 telemática 322
L1-30, L1-58	Central de conmutación 324
L1-24, L1-52	Sala 2 telemática 326
L1-18, L1-46	Salón 328
L1-8, L1-44	Oficina de profesores 330
L1-6, L1-42	Laboratorio de sistemas lógicos 331
L1-13	Pasillo occidental
L1-13, L1-15	Laboratorio de Electrónica básica 309
L1-17, L1-49	Sala de sistemas 311
L1-21, L1-55	Sala de sistemas 313
L1-25, L1-60	Sala de tesis 315
L1-31, L1-66	Oficina de profesores 317
L1-35, L1-67	Pregrado grupo I+D GNTT 319
L1-32, L1-63	Laboratorio de redes 321
L1-28, L1-59	Laboratorio de redes 323
L1-22, L1-26, L1-54, L1-56	Laboratorio de señales 325
L1-20, L1-50	Sala de audiovisuales 327
L1-16, L1-48	Oficina de profesores 329
L1-10	Espacio de Guardas



L1-2, L1-40	Sala 1 telemática 334
L1-4, L1-12, L1-14	Pasillo acceso secundario

**Tabla 4.12. Ubicación de BS del nivel tres.**

- **Prueba de calibración No. 1: Selección de frecuencia de muestreo**

Los rangos de frecuencia definidos para esta prueba están desde 1 hasta 10 Hz y varían en intervalos de 0.5 Hz, se utiliza la trayectoria mostrada en las figuras 3.12 y 3.13 del capítulo tres, ya que esta recorre dos niveles.

La tabla 4.13 muestra la precisión y el error máximo de estimación generado por los algoritmos EKF 3D y UKF 3D. La mayor precisión se logra con 9 Hz con el algoritmo UKF 3D, 0.2 m, siendo esta frecuencia la seleccionada para las pruebas de funcionamiento también se observa que el menor error se presenta con 8 Hz para los dos algoritmos.

Los algoritmos no realizan una estimación lógica con la frecuencia de muestreo de 1 Hz, dado que tanto la precisión como el error máximo producen valores desproporcionados, debido a que los estados se estiman con un periodo alto (1 segundo) y cuando se efectúan cambios de nivel en la trayectoria no son detectados. El algoritmo UKF 3D se mantiene estable a partir de la frecuencia de muestreo de 1.5 Hz, generando una precisión similar en todos los casos menor a 0.9 m.

Frecuencia (Hz)	Error máximo con EKF 3D (m)	Error máximo con UKF 3D (m)	Precisión con EKF 3D (m)	Precisión con UKF 3D (m)
1	240000	10,8	78223	15.29
1.5	180000	1,4	65460	0,30
2	6000	2,2	5121	0.50
2.5	2,6	3	2.01	0.62
3	2,6	2,2	0.47	0.89
3.5	2,4	2,4	0.47	0.43
4	2,1	2	0.36	0.31
4.5	2,05	2,4	0.31	0.30
5	2,45	2,45	0.30	0.31
5.5	1,9	1,4	0.30	0.25
6	1,25	1,25	0.27	0.26
6.5	1,1	1	0.35	0.25
7	1,3	1,4	0.28	0.26
7.5	1,1	1,1	0.28	0.27
8	0,9	0,95	0.21	0.25
8.5	1,1	1,05	0.30	0.26
9	1,45	1,25	0.21	0.20
9.5	1,05	0,85	0.26	0.28



10	2	1,6	0.24	0.22
----	---	-----	------	------

Tabla 4.13. Precisión y error máximo de algoritmos 3D, variando la frecuencia de muestreo.

- **Prueba de calibración No. 2: Distribución de probabilidad**

Con la frecuencia de muestreo definida, se realiza el test AD en cuatro trayectorias utilizando los dos algoritmos de posicionamiento, generando un número de datos de error mayor a 150. La tabla 4.14 muestra los resultados, se observa en la trayectoria No 1 y utilizando el EKF 3D que el valor P de las distribuciones Weibull y Gamma es mayor que el factor de significancia (0.05), pero la Weibull es la que más se ajusta dado que tiene el menor valor del estadístico AD.

La trayectoria No 2 es la de mayor recorrido y tiene 1428 datos de error, se observa que usando los dos algoritmos, la distribución Weibull es la de menor estadístico de AD, pero no es suficiente para determinar que los datos siguen esta distribución, ya que el valor P de todas las distribuciones es menor que el factor de significancia, por lo cual se deben hacer transformaciones a los datos para que se ajusten a una distribución. Para las trayectorias 3 y 4, utilizando los dos algoritmos la única distribución que se ajusta es la Weibull dado que las demás distribuciones son menores que el factor de significancia, concluyendo que esta distribución es la adecuada para este escenario.

Trayectoria	Algoritmo	Distribución	Número de datos	Estadístico de AD	P
1	EKF 3D	Normal	163	2.192	<0.005
1	EKF 3D	Log normal	163	1.463	<0.005
1	EKF 3D	Exponencial	163	10.493	<0.003
1	EKF 3D	Weibull	163	0.212	>0.250
1	EKF 3D	Gamma	163	0.266	>0.250
1	UKF 3D	Normal	163	6.651	<0.005
1	UKF 3D	Log normal	163	1.403	<0.005
1	UKF 3D	Exponencial	163	14.397	<0.003
1	UKF 3D	Weibull	163	0.476	0.110
1	UKF 3D	Gamma	163	0.894	0.024
2	EKF 3D	Normal	1428	15.825	<0.005
2	EKF 3D	Log normal	1428	13.781	<0.005
2	EKF 3D	Exponencial	1428	118.465	<0.003
2	EKF 3D	Weibull	1428	1.217	<0.010
2	EKF 3D	Gamma	1428	1.619	<0.005
2	UKF 3D	Normal	1428	60.477	<0.005
2	UKF 3D	Log normal	1428	15.139	<0.005
2	UKF 3D	Exponencial	1428	109.176	<0.003
2	UKF 3D	Weibull	1428	12.502	<0.010
2	UKF 3D	Gamma	1428	13.324	<0.005
3	EKF 3D	Normal	590	6.423	<0.005
3	EKF 3D	Log normal	590	5.569	<0.005





3	EKF 3D	Exponencial	590	47.104	<0.003
3	EKF 3D	Weibull	590	0.690	0.076
3	EKF 3D	Gamma	590	0.941	0.020
3	UKF 3D	Normal	590	4.947	<0.005
3	UKF 3D	Log normal	590	5.326	<0.005
3	UKF 3D	Exponencial	590	52.336	<0.003
3	UKF 3D	Weibull	590	0.420	>0.250
3	UKF 3D	Gamma	590	1.029	0.012
4	EKF 3D	Normal	273	20.629	<0.005
4	EKF 3D	Log normal	273	3.229	<0.005
4	EKF 3D	Exponencial	273	20.328	<0.003
4	EKF 3D	Weibull	273	1.794	0.051
4	EKF 3D	Gamma	273	2.822	<0.005
4	UKF 3D	Normal	273	10.926	<0.005
4	UKF 3D	Log normal	273	3.658	<0.005
4	UKF 3D	Exponencial	273	21.274	<0.003
4	UKF 3D	Weibull	273	1.104	0.113
4	UKF 3D	Gamma	273	1.380	<0.005

Tabla 4.14. Resultado del Test AD para escenario dos.

## B. Prueba de Funcionamiento

El objetivo de esta prueba es generar distintas trayectorias para evaluar el desempeño del IPS en este escenario. Los parámetros fijos se muestran en la tabla 4.15, donde se emplea la distribución de BS, la frecuencia de muestreo y la distribución de probabilidad determinadas en las pruebas de calibración.

Elementos	Valor
<b>Escenario dos</b>	
Algoritmo	EKF 3D y UKF 3D
Parámetro de señal	RSS y Barómetro
Frecuencia (Hz)	8
Distribución de probabilidad para datos de error	Weibull

Tabla 4.15. Parámetros fijos para prueba de funcionamiento.

Se generaron tres trayectorias en diferentes escaleras del edificio, las cuales se muestran en las figuras 4.13, 4.14 y 4.15. La primera utiliza las escaleras orientales, recorriendo un total de 15 m, la segunda usa las escaleras occidentales y recorre un total de 15.5 m y la tercera pasa por las escaleras centrales, recorriendo un total de 101.2 m.

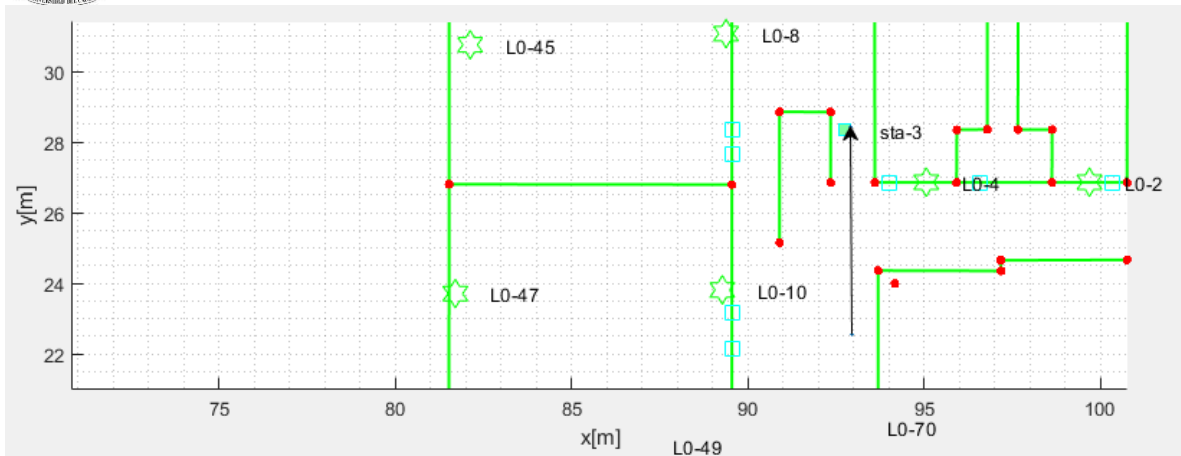


Figura a. Trayectoria sobre nivel dos.

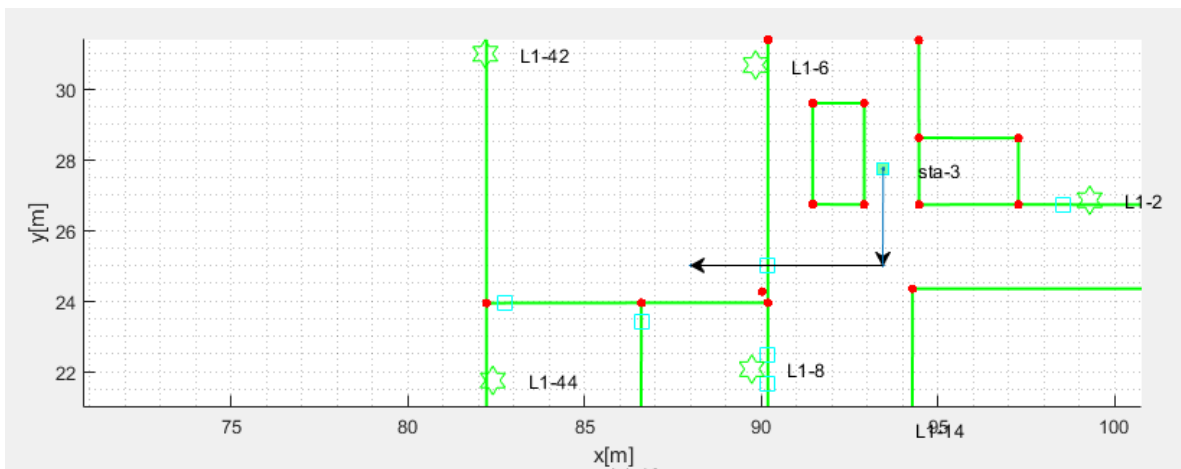


Figura b. Trayectoria sobre nivel tres.

Figura 4.13. Trayectoria No 1 sobre los niveles dos y tres.

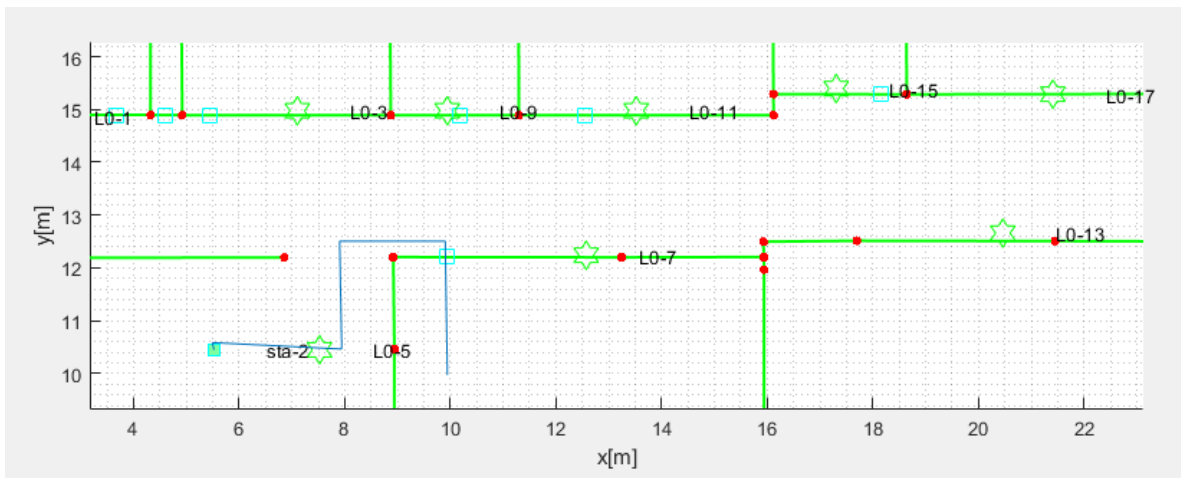


Figura a. Trayectoria sobre nivel dos.

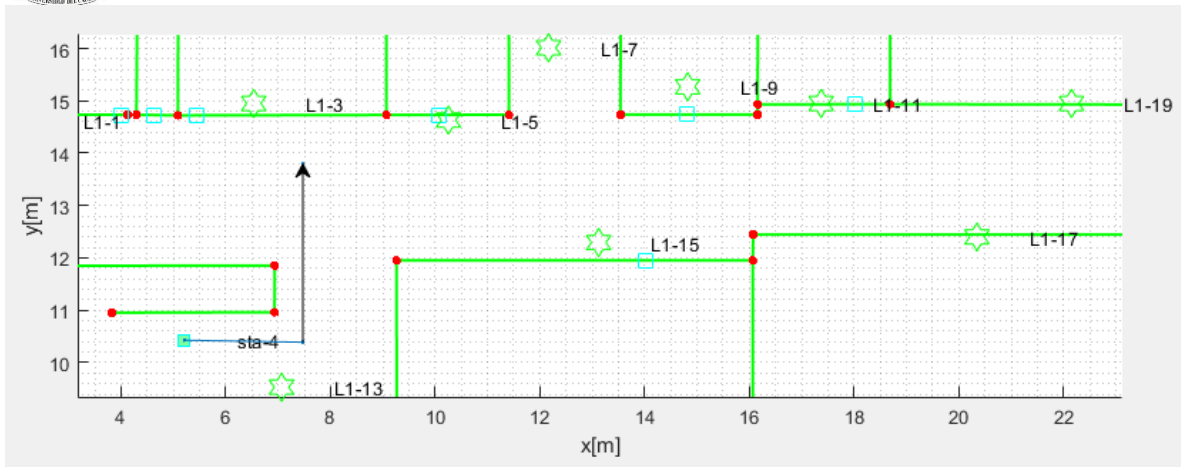


Figura b. Trayectoria sobre nivel tres.

Figura 4.14. Trayectoria No 2 sobre los niveles dos y tres.

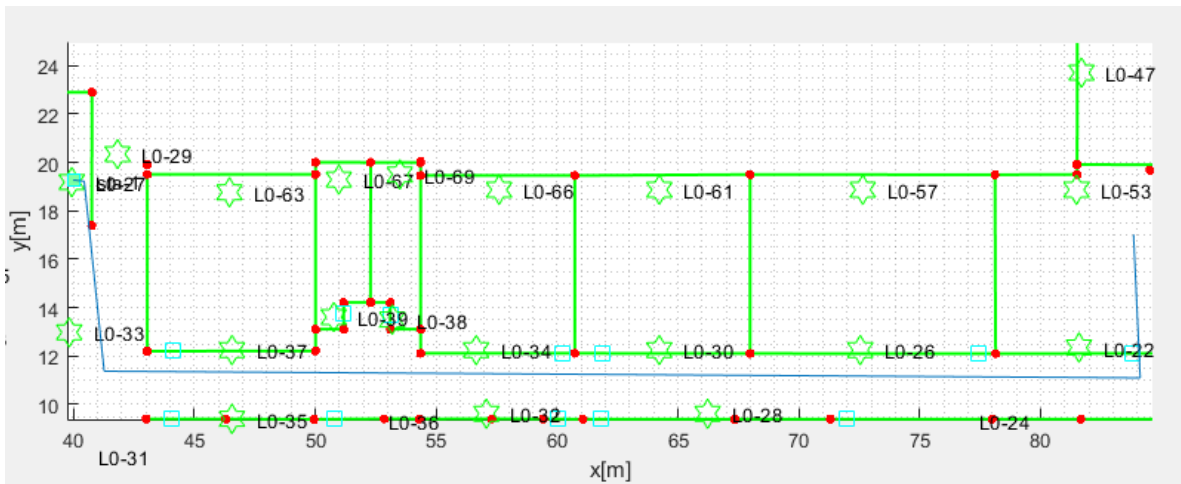
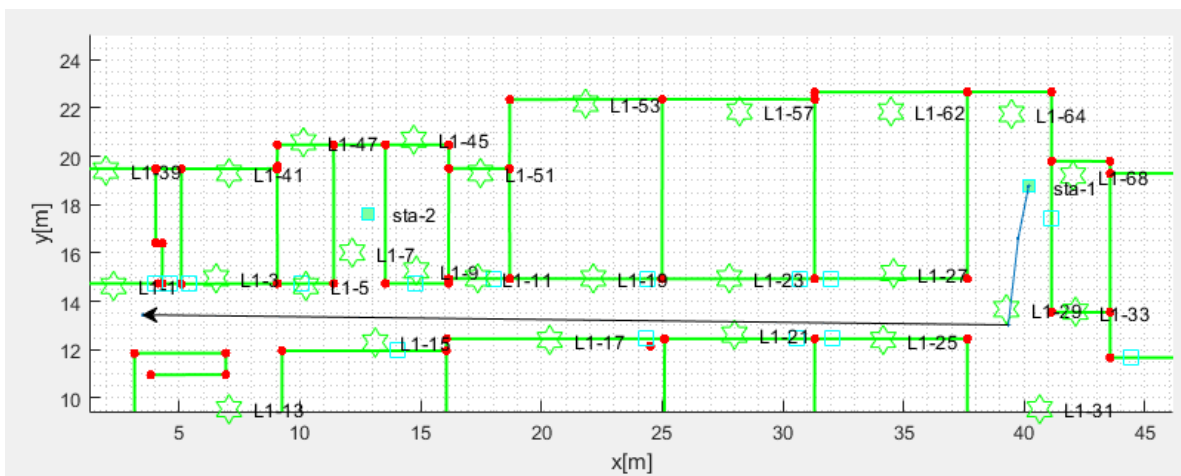


Figura a. Trayectoria sobre nivel dos.





**Figura b. Trayectoria sobre nivel tres.**

**Figura 4.15. Trayectoria No 3 sobre los niveles dos y tres.**

La tabla 4.16 muestra los resultados de las trayectorias realizadas en el escenario No 2, utilizando los dos algoritmos. La precisión es adecuada para todos los casos, dado que es menor a 0.23 m. empleando las configuraciones determinadas en las pruebas de calibración se garantiza una precisión menor a 0.3 m para cualquier trayectoria.

Trayectoria	Algoritmo	Precisión (m)
1	EKF-3D	0.16
1	UKF-3D	0.20
2	EKF-3D	0.18
2	UKF-3D	0.22
3	EKF-3D	0.14
3	UKF-3D	0.15

**Tabla 4.16. Precisión de las trayectorias sobre niveles dos niveles.**



## 5. CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones y trabajos futuros que pueden surgir a partir del desarrollo de este trabajo de grado.

### 5.1. Conclusiones

1. En la evaluación del sistema de posicionamiento en interiores para la FIET, basado en simulación, la precisión obtenida a partir de las pruebas de calibración y funcionamiento fue menor a 0.5 m para cualquier trayectoria que se genere en los escenarios definidos, utilizando el número y la ubicación de BS, el algoritmo de posicionamiento, la frecuencia de muestreo y la distribución de probabilidad que mejor desempeño brindaron.
2. En este trabajo de grado se analizaron y definieron los principales algoritmos de posicionamiento en interiores, con los cuales se determinó que el posicionamiento mediante BF brinda una precisión aceptable al sistema, dado que estos filtros actualizan la información al recibir nuevas mediciones, realizando la estimación del estado siguiente con base en las mediciones actuales, por tal motivo tanto el UKF como el EKF fueron piezas fundamentales en los algoritmos de posicionamiento que estimaron la trayectoria de todas las simulaciones.
3. En la evaluación del sistema utilizando únicamente la métrica de precisión no era posible determinar la ubicación y el recorrido del objetivo, por lo que fue necesario reevaluar el sistema en conjunto con la métrica de exactitud, concluyendo que esta última es indispensable para el análisis y evaluación de cualquier sistema de posicionamiento.
4. La escalabilidad de la herramienta Navindoor permitió modelar el edificio FIET, incorporando un modelo de propagación que describió los efectos de sombreado del edificio y graficas que permitieron evaluar el IPS con las métricas de precisión y exactitud, generando un entorno de simulación de posicionamiento para interiores en la FIET.
5. Para el escenario No. 1, el algoritmo EKF 2D realizó una estimación con una precisión menor a 0.4 m para cualquier trayectoria, utilizando una frecuencia de muestreo que se encuentre en el rango de 1 a 10 Hz, mientras que la estimación usando el algoritmo UKF 2D tuvo una precisión deficiente (menor a 46000 m) para trayectorias con recorridos mayores a 36 m.
6. Para el escenario No. 2, los algoritmos EKF 3D y UKF 3D realizaron una estimación con precisión menor 0.4 m para trayectorias sobre dos niveles, utilizando una frecuencia de muestreo de 8 Hz, donde el barómetro fue un elemento fundamental



para este escenario, dado que se usó para determinar el momento en que se presentaba un cambio de nivel.

7. Para llevar a cabo el análisis del desempeño del sistema en los escenarios definidos se implementó el modelo de propagación log-normal shadowing para representar el ambiente de interiores del edificio FIET, dado que el modelo implementado en la herramienta no cumplía con las características de la infraestructura del edificio, mientras que el modelo implementado se adaptaba con los efectos de sombreado aleatorio que podrían ocurrir al interior del edificio. La elección de los valores introducidos en el modelo se realizó con base en una investigación acerca de las mediciones reales tomadas en la FIET y en otros edificios con infraestructura similar.
8. A partir de la métrica con la que se evaluó el sistema, el número de BS instaladas para cada nivel fue 70, pero este número no es viable para una implementación a futuro, ya que la relación costo beneficio sería deficiente.

## 5.2. Trabajos Futuros

A continuación, se presentan los posibles trabajos futuros que pueden mejorar el IPS bajo simulación realizado o plantean el desarrollo de otros IPS teniendo como referente este trabajo de grado.

1. Evaluar el desempeño del sistema de posicionamiento para interiores en la FIET bajo simulación con otro modelo de propagación, de manera que sea posible analizar el comportamiento de las configuraciones y elementos con el nuevo modelo, con el fin de comparar los resultados con este trabajo de grado.
2. Implementar un algoritmo de posicionamiento para el IPS de la FIET basado en simulación, que permita utilizar las señales de Angulo de Llegada o Tiempo de Vuelo para determinar si realizan mejores estimaciones que los algoritmos utilizados en este trabajo de grado.
3. Diseñar e implementar un sistema de posicionamiento en interiores en tiempo real para el edificio FIET, con el fin de analizar el sistema con las métricas de latencia y exactitud.
4. Integrar el sistema de posicionamiento en interiores del edificio FIET con una aplicación móvil que permita visualizar la información del posicionamiento (señales de atenuación, estimaciones, PDF y CDF de los datos de error) y tener el historial de las simulaciones.
5. Implementar un prototipo de sistema de posicionamiento utilizando los algoritmos de posicionamiento EKF 2D, UKF 2D, EKF 3D y UKF 3D.



## REFERENCIAS

- [1] R. Zekavat and R. M. Buehrer, "Overview of Global Positioning Systems," in *Handbook of Position Location: Theory, Practice, and Advances*, IEEE, 2019, pp. 655–705. doi: 10.1002/9781119434610.ch20.
- [2] R. F. Brena, J. P. García-Vázquez, C. E. Galván-Tejada, D. Muñoz-Rodríguez, C. Vargas-Rosales, and J. Fangmeyer, "Evolution of Indoor Positioning Technologies: A Survey," *Journal of Sensors*, vol. 2017, p. e2630413, Mar. 2017, doi: 10.1155/2017/2630413.
- [3] J. Roman, D. Marquez-Viloria, R. A. Velásquez, and J. Botero-Valencia, "Sistema de posicionamiento en interiores utilizando señales de radio estaciones FM comerciales y Deep Learning," in *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, Jan. 2020, vol. 17, no. 1, pp. 34–43. doi: 10.4995/riai.2019.10894.
- [4] E. Lam and T. Little, "Indoor 3D Localization with Low-Cost LiFi Components," Jun. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/GLC.2019.8864119.
- [5] G. Deak, K. Curran, and J. Condell, "A survey of active and passive indoor localisation systems," *Computer Communications*, vol. 35, no. 16, pp. 1939–1954, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.comcom.2012.06.004.
- [6] K. Al Nuaimi and H. Kamel, "A survey of indoor positioning systems and algorithms," in *2011 International Conference on Innovations in Information Technology*, Apr. 2011, pp. 185–190. doi: 10.1109/INNOVATIONS.2011.5893813.
- [7] F. Zafari, A. Gkelias, and K. Leung, "A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2911558.
- [8] Z. Zhi-yuan, R. He, and T. Jie, "A method for optimizing the position of passive UHF RFID tags," in *2010 IEEE International Conference on RFID-Technology and Applications*, Jun. 2010, pp. 92–95. doi: 10.1109/RFID-TA.2010.5529867.
- [9] A. Ward, A. Jones, and A. Hopper, "A new location technique for the active office," *IEEE Personal Communications*, vol. 4, no. 5, pp. 42–47, Oct. 1997, doi: 10.1109/98.626982.
- [10] N. Kajikawa, Y. Minami, E. Kohno, and Y. Kakuda, "On Availability and Energy Consumption of the Fast Connection Establishment Method by Using Bluetooth Classic and Bluetooth Low Energy," in *2016 Fourth International Symposium on Computing and Networking (CANDAR)*, Nov. 2016, pp. 286–290. doi: 10.1109/CANDAR.2016.0058.
- [11] M. Moussa and M. Youssef, "Smart devices for smart environments: Device-free passive detection in real environments," Apr. 2009, pp. 1–6. doi: 10.1109/PERCOM.2009.4912826.
- [12] S. R. Doiphode, J. W. Bakal, and M. Gedam, "A hybrid indoor positioning system based on Wi-Fi hotspot and Wi-Fi fixed nodes," in *2016 IEEE International Conference on Engineering and Technology (ICETECH)*, Mar. 2016, pp. 56–60. doi: 10.1109/ICETECH.2016.7569191.
- [13] A. Alarifi *et al.*, "Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances," *Sensors*, vol. 16, no. 5, Art. no. 5, May 2016, doi: 10.3390/s16050707.
- [14] P. Meyer, *Probabilidad aplicaciones estadísticas*.
- [15] D. C. Harris, *Análisis químico cuantitativo*. Reverte, 2007.
- [16] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part*



- C (*Applications and Reviews*), vol. 37, no. 6, pp. 1067–1080, Nov. 2007, doi: 10.1109/TSMCC.2007.905750.
- [17] F. B. Barba, “Estudio de algoritmos de localización en interiores, para tecnologías móviles de última generación,” no. 2012, p. 71, 2012.
- [18] W. G. Mook and Instituto Geológico y Minero de España, *Isotopos ambientales en el ciclo hidrológico: principios y aplicaciones*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 2002.
- [19] M. A. Al-Ammar *et al.*, “Comparative Survey of Indoor Positioning Technologies, Techniques, and Algorithms,” *2014 International Conference on Cyberworlds*, 2014, doi: 10.1109/CW.2014.41.
- [20] S. Vahabi-Mashak, Z. Abdul-Malek, K. Mehranzamir, H. Nabipour-Afrouzi, B. Salimi, and C.-L. Wooi, “Modeling of Time of Arrival Method for Lightning Locating Systems,” *Advances in Meteorology*, vol. 2015, p. e870290, Jan. 2015, doi: 10.1155/2015/870290.
- [21] A. H. Sayed, A. Tarighat, and N. Khajehnouri, “Network-based wireless location: challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, no. 4, pp. 24–40, Jul. 2005, doi: 10.1109/MSP.2005.1458275.
- [22] S. Sadowski and P. Spachos, “RSSI-Based Indoor Localization With the Internet of Things,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 30149–30161, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2843325.
- [23] A. Ficorella, L. Pancheri, F. Acerbi, and C. Piemonte, “Effect of cell size on ambient light rejection in SiPM-based Time-of-Flight range sensors,” in *2017 IEEE SENSORS*, Oct. 2017, pp. 1–3. doi: 10.1109/ICSENS.2017.8234255.
- [24] Q. Li, R. Li, K. Ji, and W. Dai, “Kalman Filter and Its Application,” in *2015 8th International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS)*, Nov. 2015, pp. 74–77. doi: 10.1109/ICINIS.2015.35.
- [25] M. Ciezkowski, “Triangulation positioning system based on a static IR beacon-receiver system,” in *2017 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, Aug. 2017, pp. 84–88. doi: 10.1109/MMAR.2017.8046803.
- [26] G. Cullen, K. Curran, J. Santos, G. Maguire, and D. Bourne, “To wireless fidelity and beyond — CAPTURE, extending indoor positioning systems,” in *2014 Ubiquitous Positioning Indoor Navigation and Location Based Service (UPINLBS)*, Nov. 2014, pp. 248–254. doi: 10.1109/UPINLBS.2014.7033734.
- [27] C. Rocés Álvarez, “Posicionamiento dinámico, filtro de Kalman y su aplicación al buque oceanográfico Angeles Alvariño,” 2016, Accessed: Sep. 01, 2021. [Online]. Available: <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/2521>
- [28] C. Pulavarthi, R. Kalpana, and P. Parthiban, “State of Charge estimation in Lithium-Ion Battery using model based method in conjunction with Extended and Unscented Kalman Filter,” in *2020 International Conference on Power Electronics and Renewable Energy Applications (PEREA)*, Nov. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/PEREA51218.2020.9339816.
- [29] K. Zhang, Y. Zhang, and S. Wan, “Research of RSSI indoor ranging algorithm based on Gaussian - Kalman linear filtering,” in *2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*, Oct. 2016, pp. 1628–1632. doi: 10.1109/IMCEC.2016.7867493.
- [30] P. Kumar, L. Reddy, and S. Varma, “Distance measurement and error estimation scheme for RSSI based localization in Wireless Sensor Networks,” in *2009 Fifth International Conference on Wireless Communication and Sensor Networks (WCSN)*, Dec. 2009, pp. 1–4. doi: 10.1109/WCSN.2009.5434802.





- [31] L. F. P. Martínez, C. A. H. Suárez, and D. M. B. Larrotta, "Análisis experimental para un modelo de propagación de la telefonía móvil de la Universidad Militar," *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 19, no. 2, Art. no. 2, Dec. 2009, doi: 10.18359/rcin.289.
- [32] N. Vara, G. Poletto, M. Cáceres, and A. Busso, "Cálculo de distancia entre los nodos de una Red Inalámbrica Zigbee en función del parámetro RSSI," *Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica*, vol. 2, p. 8, Jun. 2015, doi: 10.30972/eitt.20275.
- [33] S. Kawakami, S. Ikeda, and T. Ohtsuki, "Localization Using Iterative Angle of Arrival Method Sharing Snapshots of Coherent Subarrays," *APSIPA ASC 2009 - Asia-Pacific Signal and Information Processing Association 2009 Annual Summit and Conference*, Jan. 2009.
- [34] M. S. Arulampalam, S. Maskell, N. Gordon, and T. Clapp, "A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 50, no. 2, pp. 174–188, Feb. 2002, doi: 10.1109/78.978374.
- [35] V. Fox, J. Hightower, Lin Liao, D. Schulz, and G. Borriello, "Bayesian filtering for location estimation," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 2, no. 3, pp. 24–33, Jul. 2003, doi: 10.1109/MPRV.2003.1228524.
- [36] J. Figueiras, "Mobile positioning and tracking from conventional to cooperative techniques." Wiley, Chichester, West Sussex ;, 2010.
- [37] H. Khazraj, F. F. da Silva, and C. L. Bak, "A performance comparison between extended Kalman Filter and unscented Kalman Filter in power system dynamic state estimation," in *2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Sep. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/UPEC.2016.8114125.
- [38] E. A. Wan and R. Van Der Merwe, "The unscented Kalman filter for nonlinear estimation," in *Proceedings of the IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium (Cat. No.00EX373)*, Oct. 2000, pp. 153–158. doi: 10.1109/ASSPCC.2000.882463.
- [39] C. Pulavarthi, R. Kalpana, and P. Parthiban, "State of Charge estimation in Lithium-Ion Battery using model based method in conjunction with Extended and Unscented Kalman Filter," in *2020 International Conference on Power Electronics and Renewable Energy Applications (PEREA)*, Nov. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/PEREA51218.2020.9339816.
- [40] E. A. Wan and R. V. D. Merwe, "The unscented Kalman filter for nonlinear estimation," in *Proceedings of the IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium (Cat. No.00EX373)*, Oct. 2000, pp. 153–158. doi: 10.1109/ASSPCC.2000.882463.
- [41] D. Feng, C. Wang, C. He, Y. Zhuang, and X.-G. Xia, "Kalman-Filter-Based Integration of IMU and UWB for High-Accuracy Indoor Positioning and Navigation," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 4, pp. 3133–3146, Apr. 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.2965115.
- [42] M. Romanovas *et al.*, "Pedestrian Indoor Localization Using Foot Mounted Inertial Sensors in Combination with a Magnetometer, a Barometer and RFID," in *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 2013, pp. 151–172. doi: 10.1007/978-3-642-34203-5\_9.
- [43] H. Heidari and V. Nabaei, *Magnetic Sensors for Biomedical Applications*. 2019. doi: 10.1002/9781119552215.
- [44] B. Li, B. Harvey, and T. Gallagher, "Using barometers to determine the height for indoor positioning," in *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Oct. 2013, pp. 1–7. doi: 10.1109/IPIN.2013.6817923.



- [45] “Wireless Communications: Principles and Practice, 2nd Edition.” <https://www.pearson.com/content/one-dot-com/one-dot-com/us/en/higher-education/program.html> (accessed Nov. 15, 2021).
- [46] C. K. Sung, S. Li, M. Hedley, N. Nikolic, and W. Ni, “Skew log-normal channel model for indoor cooperative localization,” in *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Oct. 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/PIMRC.2017.8292294.
- [47] R. Desimone, B. M. Brito, and J. Baston, “Model of indoor signal propagation using log-normal shadowing,” in *2015 Long Island Systems, Applications and Technology*, May 2015, pp. 1–4. doi: 10.1109/LISAT.2015.7160217.
- [48] J. Luis, “Modelos de Propagación en Interiores,” p. 18.
- [49] “Home,” *Navindoor*. <https://deustotech.github.io/navindoor-documentation/> (accessed Sep. 26, 2020).
- [50] P. Borges, P. Monteiro, and R. J. Machado, “Mapping RUP Roles to Small Software Development Teams,” in *Software Quality. Process Automation in Software Development*, Berlin, Heidelberg, 2012, pp. 59–70. doi: 10.1007/978-3-642-27213-4\_5.
- [51] “Metodología RUP - UTJ-TechDevelopers.” <https://sites.google.com/site/utjtechdevelopers/metodologia-rup> (accessed Sep. 01, 2021).
- [52] M. P. Bucheli and K. Muñoz, “Análisis del desempeño de un sistema prototipo de posicionamiento para interiores basado en Bluetooth Low Energy (BLE),” Universidad del Cauca, 2020.
- [53] J. Andersen, T. S. Rappaport, and S. Yoshida, “Propagation Measurements and Models for Wireless Communications Channels,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 33, pp. 42–49, Feb. 1995, doi: 10.1109/35.339880.
- [54] D. Liu, H. Mansour, P. T. Boufounos, and U. S. Kamilov, “Robust Sensor Localization Based on Euclidean Distance Matrix,” in *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Jul. 2018, pp. 7998–8001. doi: 10.1109/IGARSS.2018.8517324.
- [55] A. D. Cejas and A. Chardon, “Algoritmos avanzados de posicionamiento en interiores utilizando la combinación de distintos tipos de sensores,” Aug. 2019.
- [56] L. Díaz-Ambrona Tabernilla, “Sistema de localización en interiores,” Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2008. Accessed: Mar. 11, 2022. [Online]. Available: <https://oa.upm.es/947/>
- [57] M. D. Yacoub, D. B. da Costa, U. S. Dias, and G. Fraidenraich, “Joint statistics for two correlated Weibull variates,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 4, pp. 129–132, 2005, doi: 10.1109/LAWP.2005.845910.
- [58] “Analytical and numerical estimates of the Weibull/M/1 and Weibull/Weibull/1 queues efficiency | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore.” <https://ieeexplore.ieee.org/document/7102242> (accessed Feb. 24, 2022).
- [59] “Distribución de Weibull.” <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/probability-distributions-and-random-data/supporting-topics/distributions/weibull-distribution/> (accessed Feb. 24, 2022).
- [60] “El estadístico de Anderson-Darling.” <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/the-anderson-darling-statistic/> (accessed Feb. 15, 2022).
- [61] “Interpretar todos los estadísticos y gráficas para Prueba de normalidad.” <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/statistics/basic->



statistics/how-to/normality-test/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/ (accessed Feb. 15, 2022).

- [62] “Significancia estadística: qué es y cómo calcularla,” *Mixpanel*. <https://mixpanel.com/es/topics/statistical-significance/> (accessed Feb. 15, 2022).
- [63] “¿Cómo se utiliza el estadístico de Anderson-Darling para evaluar el ajuste de la distribución?” <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/capability-analysis/supporting-topics/distributions-and-transformations-for-nonnormal-data/anderson-darling-and-distribution-fit/> (accessed Feb. 15, 2022).



## **EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA INTERIORES EN LA FIET, BASADO EN SIMULACIÓN**

### **APÉNDICE: TABLAS DE RESULTADOS DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA INTERIORES EN LA FIET, BASADO EN SIMULACIÓN**



*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones**

**Departamento de Telecomunicaciones**

**Grupo de Radio e Inalámbricas - GRIAL**

**Popayán**

**2022**



A continuación, se presentan las tablas con los resultados obtenidos en los diferentes escenarios del sistema.

Número de Estaciones Base	Estaciones Base	Error máximo (m)	Precisión (m)
4	L0-1 hasta L0-4	49.80	9.91
6	L0-1 hasta L0-6	41.30	8.06
8	L0-1 hasta L0-8	48.63	7.43
10	L0-1 hasta L0-10	6.40	1.11
12	L0-1 hasta L0-12	2.89	0.59
14	L0-1 hasta L0-14	3.10	0.45
16	L0-1 hasta L0-16	2.78	0.56
18	L0-1 hasta L0-18	2.40	0.50
20	L0-1 hasta L0-20	1.50	0.52
22	L0-1 hasta L0-22	2	0.52
24	L0-1 hasta L0-24	1.70	0.48
26	L0-1 hasta L0-26	2.2	0.51
28	L0-1 hasta L0-28	1.84	0.45
30	L0-1 hasta L0-30	1.80	0.47
32	L0-1 hasta L0-32	1.88	0.42
34	L0-1 hasta L0-34	1.60	0.42
36	L0-1 hasta L0-36	1.87	0.41
38	L0-1 hasta L0-38	2.16	0.48
40	L0-1 hasta L0-40	2	0.38
42	L0-1 hasta L0-42	1.86	0.44
44	L0-1 hasta L0-44	1.36	0.30
46	L0-1 hasta L0-46	1.40	0.32
48	L0-1 hasta L0-48	1.07	0.28
50	L0-1 hasta L0-50	1.10	0.29
52	L0-1 hasta L0-52	1.28	0.27
54	L0-1 hasta L0-54	1.00	0.24
56	L0-1 hasta L0-56	1.03	0.25
58	L0-1 hasta L0-58	1.13	0.28
60	L0-1 hasta L0-60	1.05	0.27
62	L0-1 hasta L0-62	1.03	0.23
64	L0-1 hasta L0-64	1.05	0.25
66	L0-1 hasta L0-66	1.29	0.27



68	L0-1 hasta L0-68	1.34	0.24
70	L0-1 hasta L0-70	0.92	0.20

**Tabla A1. Resultados de las pruebas de las principales variaciones de precisión y error máximo con distribución de BS tipo uno.**

Número de Estaciones Base	Estaciones Base	Error máximo (m)	Precisión (m)
4	L0-1 hasta L0-4	37.5	8.9
6	L0-1 hasta L0-6	41	8.24
8	L0-1 hasta L0-8	20	9.1
10	L0-1 hasta L0-10	26	7.58
12	L0-1 hasta L0-12	27	7.61
14	L0-1 hasta L0-14	15	5.01
16	L0-1 hasta L0-16	17.8	5.27
18	L0-1 hasta L0-18	18.8	5.19
20	L0-1 hasta L0-20	10.5	3.50
22	L0-1 hasta L0-22	9.5	2.38
24	L0-1 hasta L0-24	13.6	2.73
26	L0-1 hasta L0-26	10.5	2.65
28	L0-1 hasta L0-28	5.8	1.20
30	L0-1 hasta L0-30	2.5	0.59
32	L0-1 hasta L0-32	1.8	0.45
34	L0-1 hasta L0-34	1.4	0.38
36	L0-1 hasta L0-36	0.8	0.57
38	L0-1 hasta L0-38	1.3	0.33
40	L0-1 hasta L0-40	1.25	0.26
42	L0-1 hasta L0-42	1.6	0.32
44	L0-1 hasta L0-44	0.95	0.28
46	L0-1 hasta L0-46	1.3	0.27
48	L0-1 hasta L0-48	0.9	0.27
50	L0-1 hasta L0-50	0.8	0.28
52	L0-1 hasta L0-52	0.9	0.34
54	L0-1 hasta L0-54	1.3	0.26
56	L0-1 hasta L0-56	0.9	0.23
58	L0-1 hasta L0-58	1.1	0.24
60	L0-1 hasta L0-60	1.18	0.27



EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA INTERIORES EN LA FIET, BASADO EN SIMULACIÓN

---

62	L0-1 hasta L0-62	1.20	0.30
64	L0-1 hasta L0-64	1.4	0.25
66	L0-1 hasta L0-66	1.1	0.27
68	L0-1 hasta L0-68	1.25	0.24
70	L0-1 hasta L0-70	1.09	0.23

**Tabla A2. Resultados de las pruebas de las principales variaciones de precisión y error máximo con distribución de BS tipo dos.**