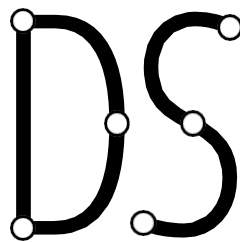


TESIS DE MÁSTER

Diseño y evaluación de un sistema de Localización en interiores mediante LoRa de 2,4 GHz

Ashok Vaishnav

Kiel, Alemania 2022



DEPARTAMENTO DE
INFORMÁTICA DE LA UNIVERSIDAD DE KIEL
GRUPO DE SISTEMAS DISTRIBUIDOS

Supervisor 1: M.Sc. Oliver Harms Supervisor 2:
Prof. Dr. Olaf Landsiedel

© Ashok Vaishnav, 2022.

Eidesstattliche Erklärung

Por ello, me dirijo a Eides para informarle de que he realizado el trabajo anterior de forma autónoma y no he utilizado otros recursos y medios distintos de los indicados.

Kiel, 19. Noviembre de 2022

Resumen

Los sistemas de localización ayudan a las personas a navegar (hacia) lugares desconocidos. Los avances técnicos actuales ofrecen a las personas dispositivos portátiles y robots de interior, lo que aumenta la popularidad del uso de sistemas de navegación. El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es adecuado para escenarios de línea de visión, como entornos exteriores, y carece de conectividad en interiores. En cambio, LoRa 2,4 GHz es una tecnología de bajo consumo, bajo coste y largo alcance que ofrece capacidades de geolocalización. Para utilizar eficientemente la tecnología para la localización en interiores, estudiamos su rendimiento de alcance con varios parámetros de modulación LoRa considerando diferentes escenarios.

En esta tesis presentamos un sistema de evaluación de alcance y un sistema de localización en interiores. El sistema de evaluación nos enriquece con parámetros LoRa adecuados para entornos interiores y se utiliza para lograr el posicionamiento en sistemas de localización en interiores. Nuestra evaluación ofrece una breve perspectiva sobre los parámetros de modulación LoRa en diferentes escenarios. Además, el rendimiento del sistema de localización en interiores depende en gran medida del rendimiento del alcance de los dispositivos LoRa. Además, nuestra evaluación muestra que el posicionamiento con LoRa 2,4 GHz es fiable cuando se utilizan parámetros óptimos de modulación LoRa.

Contenido

| | |
|--|------------|
| Lista de figuras | vii |
| Lista de cuadros | ix |
| 1 Introducción | 1 |
| 2 Fondo | 3 |
| 2.1 LoRa..... | 3 |
| 2.2 Ranging..... | 4 |
| 2.3 Localización/Posicionamiento..... | 4 |
| 2.4 Transceptor Semtech SX1280..... | 6 |
| 2.5 ZephyrOS..... | 6 |
| 2.6 Motor de telemetría Semtech SX1280..... | 7 |
| 2.6.1 Formato de los paquetes del motor de telemetría..... | 7 |
| 2.6.2 El proceso de exploración | 8 |
| 3 Trabajos relacionados | 9 |
| 3.1 Localización en interiores con otras tecnologías | 9 |
| 3.1.1 Wi-Fi | 9 |
| 3.1.2 Banda ultraancho (UWB)..... | 9 |
| 3.1.3 Identificación por radiofrecuencia (RFID)..... | 10 |
| 3.1.4 Bluetooth de baja energía (BLE)..... | 10 |
| 3.2 Ranging con SX1280 por Stuart Robinson..... | 10 |
| 3.3 Ranging con diferentes parámetros LoRa..... | 11 |
| 3.4 Intersección Círculo-Círculo..... | 12 |
| 4 Diseño | 13 |
| 4.1 Modos y configuración de LoRa..... | 13 |
| 4.2 Sistema de evaluación de alcance | 14 |
| 4.2.1 Configuración previa a la evaluación y Entorno..... | 14 |
| 4.2.2 Procedimiento de ejecución..... | 16 |
| 4.3 Sistema de localización en interiores..... | 18 |
| 4.3.1 Arquitectura del sistema..... | 18 |
| 4.3.2 Funciones asociadas del sistema | 19 |
| 4.3.3 Preparación y colocación de nodos | 20 |
| 4.3.4 El procedimiento de ejecución | 20 |
| 4.3.5 Proceso de prelocalización | 21 |
| 4.3.6 Ranging y localización..... | 22 |
| 4.3.7 El algoritmo de localización..... | 23 |
| 5 Aplicación | 25 |
| 5.1 Hardware..... | 25 |
| 5.1.1 LoRa 2,4 GHz | 25 |
| 5.1.2 La unidad microcontroladora anfitriona (MCU) . | 25 |
| 5.2 Sistema operativo..... | 26 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.3 | Integración de LoRa..... | 26 |
| 5.3.1 | Conexión de SX1280 | 26 |
| 5.3.2 | LoRa Ranging | 28 |
| 5.4 | El sistema de localización en interiores..... | 29 |
| 5.4.1 | Operaciones y estructura de la carga útil..... | 29 |
| 5.4.2 | Maestro..... | 29 |
| 5.4.3 | Ancla | 30 |
| 5.4.4 | Móvil..... | 30 |
| 5.5 | El algoritmo de localización | 31 |
| 6 | Evaluación | 33 |
| 6.1 | LoRa como receptor..... | 33 |
| 6.2 | Sistema de evaluación de alcance | 33 |
| 6.2.1 | Línea de visión (Line of Sight (LoS))..... | 34 |
| 6.2.2 | Sin línea de visión directa (NLoS)..... | 35 |
| 6.2.3 | Comparación breve de LoS y NLoS..... | 36 |
| 6.3 | Sistema de localización en interiores..... | 38 |
| 6.3.1 | Configuración del sistema | 38 |
| 6.3.2 | Calidad de alcance..... | 39 |
| 6.3.3 | Control de eficiencia..... | 40 |
| 6.3.4 | Algoritmo Eficacia en distintos casos..... | 42 |
| 6.3.5 | Conclusión de la evaluación del sistema de localización | 44 |
| 7 | Conclusión | 45 |
| 7.1 | Trabajos futuros..... | 45 |
| | Acrónimos | 47 |
| | Bibliografía | 49 |
| A | Parcelas de evaluación adicionales | I |
| A.1 | Sistema de evaluación de alcance..... | I |
| A.1.1 | LoS..... | I |
| A.1.2 | NLoS..... | I |
| A.2 | Sistema de localización en interiores | II |

Lista de figuras

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Por qué LoRa frente a otras tecnologías inalámbricas [3]..... | 3 |
| 2.2 | Método de posicionamiento por trilateración | 4 |
| 2.3 | Método de posicionamiento por triangulación | 5 |
| 2.4 | Método de posicionamiento por multilateración | 5 |
| 2.5 | SX1280 Proceso de alcance basado en el tiempo de vuelo de ida y vuelta (RTof) 7 | |
| 2.6 | Ilustración de las distintas secciones del paquete SX1280 Ranging [20]..... | 7 |
| 3.1 | Ilustración geométrica de dos círculos que se cruzan [29]..... | 12 |
| 4.1 | Operación de Ranging entre Entidades Maestra y Esclava. | 14 |
| 4.2 | LoS Ranging entre Maestro y Esclavo..... | 15 |
| 4.3 | NLoS Ranging entre Maestro y Esclavo..... | 15 |
| 4.4 | Flujo de control del sistema de evaluación. | 16 |
| 4.5 | Ilustración por pasos temporales del intercambio de paquetes..... | 17 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.6 | Ilustración paso a paso del Proceso de Ranging. | 18 |
| 4.7 | Arquitectura del sistema de localización en interiores. | 19 |
| 4.8 | Flujo de control previo a la localización. | 21 |
| 4.9 | Flujo de control de alcance y localización. | 22 |
| 4.10 | Flujo de control del algoritmo de localización. | 23 |
| 5.1 | Placa DLP-RFS1280 montada con transceptor SX1280 [30]. 25 | |
| 5.2 | La placa Nordic Board nRF52840DK [31]. | 26 |
| 5.3 | Conexión física entre el nRF52840DK y el transceptor SX1280. | 27 |
| 5.4 | Todas las intersecciones de círculos y sus puntos de intersección. | 31 |
| 5.5 | Puntos de intersección filtrados. | 32 |
| 5.6 | Ubicación estimada. | 32 |
| 6.1 | Visión general del gráfico de error de distancia LoS | 34 |
| 6.2 | Visión general del gráfico de error de distancia NLoS. | 35 |
| 6.3 | LoS Ranging en escenario NLoS | 36 |
| 6.4 | NLoS Ranging en escenario LoS. | 36 |
| 6.5 | Factor de dispersión (SF)s con BW 1600KHz. | 37 |
| 6.6 | SFs con BW 1600KHz. | 37 |
| 6.7 | Plano del banco de pruebas de la Universidad de Kiel | 38 |
| 6.8 | Un ejemplo que ilustra una situación de Buen Alcance. | 39 |
| 6.9 | Un ejemplo que ilustra una situación de Bad Ranging. | 40 |
| 6.10 | Localización con eficiencia ajustada | 41 |
| 6.11 | Localización con eficacia holgada. | 41 |
| 6.12 | El mejor caso de localización | 42 |
| 6.13 | Localización con más de tres puntos de intersección tras el filtrado. | 43 |
| 6.14 | Localización cuando no todos los círculos se intersecan. | 43 |
| 6.15 | Localización con valores atípicos (Over-Ranging). | 44 |
| A.1 | SFs con BW 400KHz. | I |
| A.2 | SFs con BW 800KHz. | I |
| A.3 | SFs con BW 400KHz. | I |
| A.4 | SFs con BW 800KHz. | I |
| A.5 | Varios casos con distinta posición del nodo móvil. | II |

Lista de cuadros

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | SX1280 soportado Parámetros de modulación | 6 |
| 3.1 | Diferencia entre la distancia real y la distancia medida por el aparato [27]. | 11 |
| 3.2 | Muestras medias de 100 m con diferentes combinaciones de BW y SF[28]..... | 11 |
| 6.1 | Muestras de distancia estimada con diferentes combinaciones de Bandwidth (BW) y SF en LoS a 20 metros de distancia real..... | 34 |
| 6.2 | Muestras de distancia estimada con diferentes combinaciones de BW y SF en NLoS a 20 metros de distancia real. | 35 |

Capítulo 1

Introducción

Vivimos en un mundo muy avanzado en cuanto a dispositivos conectados. Hay millones de dispositivos móviles inalámbricos activos que realizan las tareas deseadas. La localización de estos dispositivos se ha convertido en un tema interesante y se está investigando para obtener "geoposiciones". Muchos de los sistemas de posicionamiento existentes se utilizan para la localización de aviones, trenes, vehículos, patinetes electrónicos, teléfonos móviles, etc. utilizando, por ejemplo, tecnologías GNSS. Estas tecnologías están limitadas al posicionamiento en exteriores y no ofrecen mucha precisión en interiores [1]. Por lo tanto, la localización/posicionamiento de dispositivos móviles inalámbricos en entornos de interior gana interés para la investigación que puede ser útil para la localización de dispositivos en edificios, aeropuertos, hospitales, estaciones de tren, supermercados, almacenes, etc. [2]. [2].

En las redes inalámbricas, se han explorado tecnologías como Wi-Fi, Bluetooth, UWB y se ha implementado su función de localización, pero cada una de ellas tiene sus propias limitaciones en términos de alcance, precisión, coste y consumo de energía. Hay tecnologías que utilizan bandas de frecuencia más altas y funcionan en condiciones de baja potencia y prometen una comunicación a larga distancia. LoRa es una de ellas y utiliza el espectro de 2,4 GHz, lo que puede ser una solución económica, ya que los dispositivos LoRa son apreciados por su precio, alcance y consumo de energía [3]. El SX1280 de Semtech es un módulo LoRa disponible en todo el mundo y que ofrece una línea de alcance integrada. Disponer de estos módulos en una red de sensores sería compatible con varias aplicaciones del mundo real en la localización de dispositivos en tiempo real. Por lo tanto, nos interesa explorar el alcance en interiores y la precisión de posicionamiento de LoRa 2,4 GHz utilizando el módulo LoRa SX1280 de Semtech.

El enfoque para la localización en interiores es doble. En primer lugar, realizamos una medición de distancia, mediante la cual obtenemos la distancia entre dos posiciones diferentes. Para obtener las mejores mediciones de distancia, realizamos algunas evaluaciones basadas en distintos parámetros de red, como la frecuencia, el ancho de banda y la velocidad de transmisión de datos. Esta evaluación es necesaria para los dispositivos inalámbricos, ya que puede haber errores de alcance causados por la propagación de ondas multitrayecto a través de paredes, objetos de cristal, superficies reflectantes, etc. en entornos interiores [4]. A continuación, en la segunda etapa, utilizamos los resultados de la etapa anterior y estimamos la ubicación del objeto. Un sistema de localización debe tener un número suficiente de anclas como base para aplicar un algoritmo de localización. Para ello, disponemos de un banco de pruebas que contiene nuestros módulos LoRa repartidos a lo largo de distancias medidas. Aparte de la arquitectura física, el sistema debe funcionar de forma sincronizada para lograr un entorno de comunicación no ambiguo que mejore la estabilidad. Por lo tanto, utilizamos Zephyr OS para soportar nuestro enfoque para una arquitectura de software organizada y una gestión eficiente de los recursos [5].

Hemos observado que el motor de alcance incorporado con el módulo LoRa Semtech SX1280 no siempre da como resultado buenos valores de alcance en un entorno interior cuando se compara con la distancia real. Por lo tanto, se aplica una estrategia de prelocalización para recopilar datos de alcance mediante la aplicación de permutaciones y combinaciones en la modulación LoRa pa-.

rámetros como el ancho de banda y el factor de dispersión en entornos LoS y NLoS. Tras las comparaciones, hemos descubierto que la configuración de alcance óptima para el módulo LoRa SX1280 con un ancho de banda de 1600 KHz combinado con el factor de dispersión SF_9 resultaría prometedora con el enfoque de localización por multilateración.

Nuestras principales aportaciones son:

- Diseñamos un sistema de localización en interiores utilizando LoRa 2.4GHz.
- github.com/ashokvaishnav708/IndoorLocalizationLoRaProject
- Evaluamos LoRa 2.4GHz Ranging en entornos LoS y NLoS.
- Discutimos las diferencias entre las medidas reales y las medidas LoRa.
- Encontramos los parámetros óptimos de modulación LoRa a 2,4 GHz para el alcance en interiores.
- Evaluamos LoRa 2.4Ghz Ranging en nuestro sistema de localización.

El resto de esta tesis se organiza como sigue. En el capítulo 2 se ofrece la información básica necesaria sobre LoRa y varias metodologías de localización. En el capítulo 3 mostramos las diferencias de localización en interiores logradas con distintas tecnologías inalámbricas y temas ya explorados para LoRa. El capítulo 4 presenta el diseño general del sistema y sus referencias. El capítulo 5 explica la implementación del algoritmo para nuestro sistema de localización, y en el capítulo 6 mostramos algunas imágenes y evaluaciones realizadas durante el proceso de construcción de nuestro sistema. Por último, en el Capítulo 7 se concluye el trabajo con un debate y una conclusión general.

Capítulo 2

Fondo

Empezaremos introduciendo los términos esenciales y proporcionando una visión general del sistema operativo que utilizamos. Además, se describen las distintas técnicas de localización, los métodos de posicionamiento y la funcionalidad de localización con el transceptor SX1280.

2.1 LoRa

LoRa son las siglas de Long-Range (largo alcance) y es una tecnología derivada del espectro ensanchado chirp que utiliza modulación de espectro ensanchado [3]. La tecnología LoRa fue desarrollada por una empresa llamada Semtech, y cuenta con un protocolo inalámbrico diseñado específicamente para comunicaciones de largo alcance y bajo consumo, y puede transmitir/recibir paquetes a/desde ubicaciones remotas [6]. Estas características hacen de LoRa una solución eficaz e ideal para IoT y muchas aplicaciones inalámbricas de que dependen de la comunicación a larga distancia. Los dispositivos LoRa y el estándar LoRa Wide Area Network (LoRaWAN) ofrecen grandes prestaciones para las aplicaciones IoT, incluyendo un bajo consumo de energía y transmisiones de datos seguras. Esta tecnología se utiliza actualmente en varios sectores del mercado de las redes y ofrece un alcance mayor que las redes celulares normales [3]. Como se muestra en la figura 2.1, LoRa llena el vacío tecnológico de las redes celulares, Wi-Fi y BLE que requieren un gran ancho de banda o una gran potencia, o tienen un alcance limitado o no pueden penetrar en entornos interiores profundos [3].

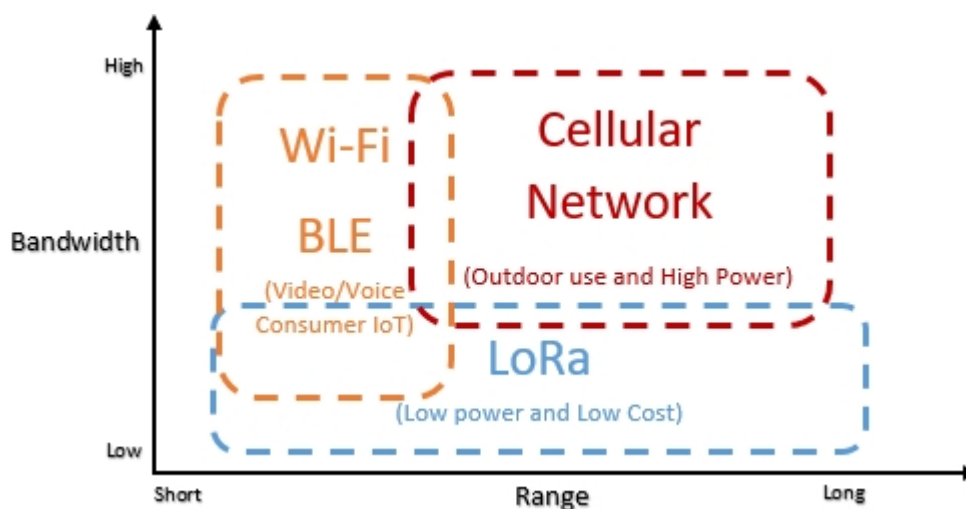


Figura 2.1: Por qué LoRa frente a otras tecnologías inalámbricas [3].

2.2 Ranging

Ranging es un proceso para determinar la distancia entre dos geolocalizaciones diferentes. En la tecnología inalámbrica se ha investigado mucho sobre la estimación de distancias. Existen varias técnicas de alcance que se utilizan para la localización de dispositivos, entre las cuales cuatro técnicas principales son la intensidad de la señal recibida (RSS), el tiempo de llegada (ToA), la diferencia de tiempo de llegada (TDoA) y el ángulo de llegada (AoA) [7]. Estas técnicas se basan en el supuesto de que las ondas propagadas viajan a la misma velocidad que la luz y miden la distancia en consecuencia.

Una versión ampliada de ToA es RToF, que es una técnica similar a Time-of-Flight, en la que la distancia se mide en el extremo emisor y requiere una sincronización relativa del reloj [7]. Esta técnica también es utilizada por el motor SX1280 Ranging Engine de Semtech.

2.3 Localización/Posicionamiento

Existen varios métodos para estimar la ubicación de un objeto en un plano espacial 2D. Para ello, se mide la distancia entre el objeto y un número determinado de puntos de anclaje. Los métodos preferidos para la localización son la lateración y la angulación. Estos métodos se aplican en un plano 2d con tres o más anclas conocidas en ubicaciones fijas [8]. Se describen a continuación tres técnicas principales de posicionamiento.

La trilateración es un método geométrico para determinar la ubicación de un objeto que requiere un mínimo de tres puntos de coordenadas de referencia conocidos y sus distancias al objeto [9]. Las distancias se consideran el radio de un círculo y el punto de intersección entre esos círculos es la ubicación del objeto [10], [11]. Para el cálculo, obtenemos tres ecuaciones diferentes utilizando el teorema de Pitágoras con radios (distancias) y sus puntos de coordenadas. Resolviendo estas ecuaciones obtendremos un punto que se denomina intersección (posición del objeto).



Figura 2.2: Método de posicionamiento por trilateración

2.4 Transceptor Semtech SX1280

El SX1280 es el silicio desarrollado por la empresa Semtech. Los transceptores SX1280 se utilizan para comunicaciones de alcance ultralargo, que utilizan la banda de 2,4 GHz y pueden soportar grandes interferencias. Al soportar grandes interferencias, estos transceptores son ideales para sistemas inalámbricos robustos y fiables [15], [16]. Es el primer módulo de banda ISM con funcionalidad ToF integrada. Además, proporciona transmisión de datos clara punto a punto, multipunto y multipunto entre módulos LoRa [16]. Para diferentes usos y propósitos, como se muestra en la tabla 2.1, el módulo SX1280 puede configurarse con una combinación de diferentes parámetros de modulación como ancho de banda, factor de dispersión y tasa de codificación según sea necesario.

| Ancho de banda kHz | Factor de dispersión | Tasa de codificación |
|-----------------------|----------------------|-------------------------|
| BW_1600 | SF_5 | CR_4_5 |
| BW_800 | SF_6 | CR_4_6 |
| BW_400 | SF_7 | CR_4_7 |
| BW_200 | SF_8 | CR_4_8 |
| | SF_9 | CR_LI_4_5 |
| | SF_10 | CR_LI_4_6 |
| | SF_11 | CR_LI_4_8 |
| | SF_12 | |

Tabla 2.1: Parámetros de modulación compatibles con SX1280

El transceptor SX1280 incluye un motor de alcance que define los paquetes de alcance y su secuencia de intercambio entre los módulos maestro y esclavo. La cabecera del paquete de alcance contiene un ID de alcance (máximo 32 bits) para verificar la solicitud de alcance. El nodo maestro puede acceder a la información de alcance.

2.5 ZephyrOS

Zephyr OS es un proyecto colaborativo de código abierto cuyo objetivo es un Sistema Operativo en Tiempo Real (RTOS) pequeño y escalable para soportar múltiples arquitecturas y dispositivos embebidos con limitación de recursos [5]. Está publicado bajo licencia Apache 2.0 op en source. Zephyr proporciona un núcleo de tamaño reducido con varias bibliotecas y servicios de sondeo e interrupción GPIO (General Purpose Input Output) para dispositivos esclavos. Zephyr OS proporciona un Modelo de Controlador de Dispositivo, que amplía aún más el soporte de para los dispositivos disponibles, así como para futuros dispositivos. La implementación del controlador utiliza la interfaz de programación de aplicaciones (API) para la interacción con los dispositivos [17]. Un conjunto existente de APIs es reutilizable para otros dispositivos que tengan una arquitectura similar. Se utilizan árboles de dispositivos para describir el hardware, lo que proporciona una capa de abstracción entre el dispositivo y el SO que hace que sus API sean ejecutables en diferentes plataformas de hardware. Soporta protocolos Native Networking Stack para una comunicación segura y fiable [18] y drivers para una amplia gama de tecnologías inalámbricas como BLE, Wi-Fi, LoRa, etc.

2.6 Motor de telemetría Semtech SX1280

El transceptor SX1280 de Semtech lleva incorporado un motor de alcance diseñado por Semtech que gestiona las operaciones de alcance y los paquetes entre el emisor y el receptor (también denominados maestro y esclavo). El motor de ranging asegura internamente la fijación de errores causados por retrasos ocurridos en todo el proceso de ranging. El motor de ranging se basa en el concepto RToF para realizar el ranging [19]. La figura 2.5 muestra el proceso RToF y el intercambio de paquetes entre el nodo maestro y el esclavo.

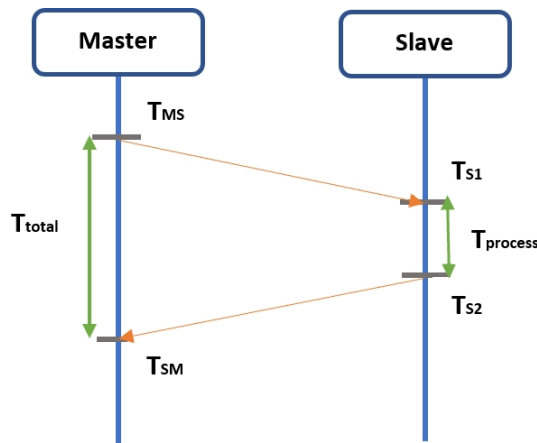


Figura 2.5: Proceso de telemetría basado en RToF del SX1280

El tiempo relativo del proceso RToF es la diferencia entre el tiempo total en el maestro y el tiempo de proceso en el esclavo.

$$T_{air} = T_{total} - T_{proceso}$$

La distancia se calcula entonces como:

$$d = \frac{c \cdot (T)_{air}}{2}$$

2.6.1 Formato de paquetes del motor de telemetría

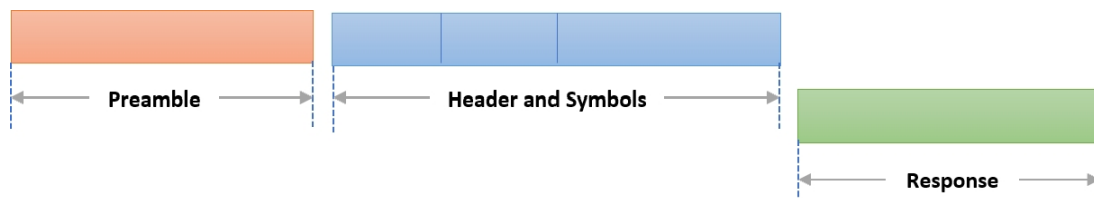


Figura 2.6: Ilustración de las distintas secciones del paquete SX1280 Ranging [20].

En el motor de alcance SX1280 incorporado de Semtech, los dispositivos intercambian paquetes especiales similares al formato de paquete LoRa, diferenciándolo con un bit reservado en el preámbulo

indica el paquete de alcance [20]. El paquete consta de tres secciones principales: el preámbulo, la cabecera maestra y los símbolos de alcance, y la respuesta de alcance. En la figura 2.6, la sección azul indica la cabecera maestra que incluye el ID de alcance, que puede configurarse en 8, 16, 24 o 32 bits, y los símbolos de alcance. En el extremo del esclavo, éste responde con la respuesta de alcance indicada en la sección verde.

$$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{BW}$$

2.6.2 El proceso de exploración

El proceso de alcance con SX1280 descrito por Semtech[19] es el siguiente:

1. El maestro activa el proceso RToF e inicia el intercambio de paquetes de alcance emitiendo una solicitud de alcance para un ID de esclavo único e inicia un temporizador interno.
2. El esclavo recibe el paquete de ranging y comprueba la solicitud de ranging con su ID único. Si es válida, el esclavo inicia el proceso de sincronización. Sin embargo, el maestro y el esclavo nunca intercambian un tiempo absoluto común, sino que el esclavo adjunta el tiempo que tarda en procesar la solicitud de alcance y envía una respuesta al maestro.
3. Por último, al recibir una respuesta, el Maestro puede deducir el tiempo de vuelo de ida y vuelta a partir del tiempo transcurrido.

[Nota]: Se puede establecer un tiempo de espera tanto en el extremo maestro como en el esclavo.

Capítulo 3

Trabajos relacionados

En este capítulo se analizan las tecnologías de radio ya exploradas para la localización y el posicionamiento en interiores. Este análisis es esencial para lograr un enfoque optimista para nuestro sistema y comparaciones en las evaluaciones. Además, en examinaremos el trabajo previo realizado en LoRa 2,4 GHz con Semtech SX1280.

3.1 Localización en interiores con otras tecnologías

Para dirigir el mundo hacia los edificios inteligentes y la automatización, han surgido muchos problemas en el seguimiento de la ubicación de los dispositivos que han llamado la atención de los investigadores. Por lo tanto, se ha investigado mucho en diferentes rincones del mundo con las tecnologías inalámbricas disponibles como BLE, Wi-Fi, UWB, RFID, etc., ya que con los enfoques de localización por satélite resulta difícil localizar los dispositivos debido a la pérdida de señal en interiores. Por lo tanto, en esta sección hablaremos de estas tecnologías.

3.1.1 Wi-Fi

En los últimos años, la tecnología Wi-Fi se ha hecho muy popular para proporcionar instalaciones de red en edificios y disponer de una infraestructura bien establecida. Por lo tanto, hay menos necesidad de instalar nuevo hardware. Hay varios artículos que presentan la localización en interiores mediante Wi-Fi. Hay muchas formas de conseguir el alcance en Wi-Fi. RSS es la metodología más utilizada para calcular distancias entre AP y dispositivos en Wi-Fi, ya que es el método más sencillo que tiene por objeto evaluar el alcance de la señal en términos de potencia. En el trabajo [10], los autores utilizaron métodos basados en Trilateration y fingerprinting para lograr el posicionamiento de dispositivos utilizando el método de estimación de distancia de RSS.

En el método de huellas dactilares, hay una fase fuera de línea y otra en línea, en la que se crea una base de datos basada en diferentes ubicaciones con su respectiva intensidad RSS. En la fase en línea, se realiza una prueba en vivo con el dispositivo y los puntos de acceso establecidos y los valores medidos se comparan con los valores almacenados en la base de datos y el dispositivo se localiza en .

3.1.2 UWB

La UWB es la tecnología de posicionamiento más precisa y prometedora de todas las disponibles [21]. El canal de comunicación UWB se extiende a lo largo de un amplio espectro de frecuencias, lo que permite que las ondas viajen eficazmente a través de paredes y objetos interiores incluso con propagación multitrayecto [22]. Los autores de [23] utilizan un enfoque de dos pasos para obtener el posicionamiento en interiores, donde en el primer paso se obtiene la distancia entre el transmisor y el receptor.

En el segundo paso, estiman la posición utilizando la técnica de alcance TDoA, que depende de la sincronización temporal entre el receptor y el transmisor. Por lo tanto, en el primer paso, utilizan ToA como algoritmo de estimación de tiempo para obtener precisión de posicionamiento. Sin embargo, la UWB también es propensa a sufrir interferencias con objetos metálicos y superficies y, por lo tanto, requiere más atención con los objetos del entorno.

3.1.3 RFID

También existe un conocido sistema de localización que utiliza etiquetas RFID. Los receptores RFID pueden colocarse en distintas esquinas del edificio con etiquetas [24]. Dentro de la RFID se pueden aplicar muchos métodos de localización, siendo el de proximidad el más utilizado para obtener la distancia entre objetos y etiquetas fijas [21]. Esto se realiza mediante etiquetas que emiten diferentes frecuencias de radio y son recibidas por receptores y viceversa, que utiliza una frecuencia predefinida y un protocolo de intercambio de datos.

3.1.4 BLE

Los dispositivos habilitados para BLE son eficientes energéticamente y sus procedimientos de despliegue son sencillos en comparación con las tecnologías mencionadas, lo que los hace interesantes para explorar la localización en interiores [24]. BLE puede ofrecer alcance con todas las técnicas de posicionamiento y más tarde se puede aplicar cualquier algoritmo de localización para obtener la ubicación del objeto. El Indicador de Intensidad de Señal Recibida (RSSI) es un método comúnmente utilizado para obtener la distancia entre etiquetas BLE. Los autores de [25] se aprovechan de la diversidad de canales de BLE y recogen los valores RSSI en diferentes canales y eligen o bien el mejor RSSI (mayor valor) o consideran la media de todos los valores o con el algoritmo de Combinación de Máxima Relación (MRC) para la estimación de la distancia. Además, para la estimación de la posición presentaron diferentes escenarios y sus respectivas soluciones con el enfoque de trilateración, es decir, los círculos pueden intersectarse en un único punto (caso ideal), los círculos se intersectan en un área, dos círculos se intersectan y uno no, ninguno de los círculos se intersectan.

3.2 Ranging con SX1280 por Stuart Robinson

Stuart Robinson es un investigador que estudió Radio Televisión y Electrónica y no sólo ha explorado dispositivos habilitados para LoRa, sino que también ha escrito librerías Arduino para soportar transceptores LoRa [26]. Stuart ha realizado varias pruebas de alcance con el SX1280 a diferentes distancias en un entorno outdoorLoS [27], en metros y también en kilómetros. Stuart realizó evaluaciones de distancias desde 4,4KM hasta 40KM y descubrió que el transceptor SX1280 podía realizar distancias de más de 40 km con una potencia de señal de 4dBm. Cuando se comparó el alcance del SX1280 con Google Maps a una distancia de 40 km, se observó un error del +0,2%, lo cual es aceptable. Esto sugiere que el alcance con SX1280 podría llegar a 80 km en LoS con 10dBm de potencia de señal. La tabla 3.1 muestra los resultados de las pruebas de corto alcance (en metros).

| Distancia real | Distancia medida |
|----------------|------------------|
| 0 | 4.4M |
| 50M | 57.6M |
| 100M | 103M |
| 150M | 148M |
| 200M | 201M |
| 250M | 253M |

Tabla 3.1: Diferencia entre la distancia real y la distancia medida por el dispositivo [27].

A partir de las evaluaciones de Stuart para corto alcance, podemos decir que la distancia medida por el transceptor frente a la distancia real es muy similar, y podemos motivar a a considerar SX1280 adecuado para interiores como el medio ambiente.

3.3 Ranging con diferentes parámetros LoRa

LoRa se basa en la modulación de espectro ensanchado chirp, que la hace robusta frente a las interferencias. Sin embargo, varios ajustes de los parámetros de modulación de LoRa pueden afectar significativamente a su rendimiento inalámbrico. En la tabla 2.1 hemos presentado los diferentes valores de SF y BW, que pueden utilizarse como varias combinaciones para medir el rendimiento óptimo del transceptor en el alcance. En el artículo [28] se presenta un estudio similar. Los autores han realizado varias pruebas con diferentes combinaciones de SF y BW en LoS y han evaluado **el error medio** considerando una distancia de alcance de 100 metros.

| 100 m | 400 kHz | 800 kHz | 1600kHz |
|-------------|---------|---------|---------|
| SF5 | 106.41 | 99.00 | 96.86 |
| SF6 | 110.20 | 110.10 | 98.93 |
| SF7 | 116.00 | 106.30 | 100.35 |
| SF8 | 124.75 | 111.40 | 104.05 |
| SF9 | 145.75 | 121.25 | 109.95 |
| SF10 | 182.23 | 143.71 | 122.15 |

Tabla 3.2: Muestras medias de 100 m con diferentes combinaciones de BW y SF[28].

En la tabla 3.2 se muestran las muestras medias evaluadas para una distancia real de 100 metros. Las evaluaciones muestran que el valor más cercano a la distancia real es con SF 7 y BW 1600kHz, y se considera la combinación óptima para realizar el alcance con SX1280. Y los autores descubrieron que un SF más alto no proporciona necesariamente mediciones efectivas, aunque se contradice en teoría. Este trabajo de investigación proporciona una idea para realizar evaluaciones similares para obtener SF y BW óptimos para nuestro entorno de configuración y, además, tendremos varias opciones para elegir combinación adecuada para la aplicación.

3.4 Intersección Círculo-Círculo

Paul Bourke presentó un estudio para diferentes figuras geométricas en su sitio web[29], donde también describe la teoría para calcular los puntos de intersección entre dos círculos y posibles casos de excepción en los que las intersecciones no son posibles. Esta teoría es útil para el método de multilateración, en el que evaluamos la intersección entre tres o más círculos.

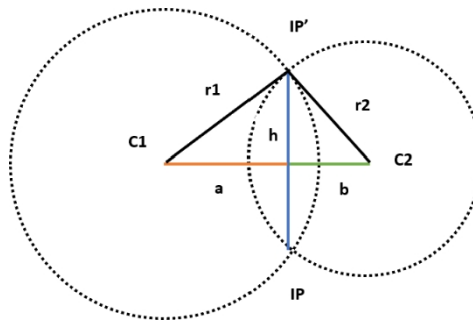


Figura 3.1: Ilustración geométrica de dos círculos que se cruzan [29].

La teoría proporciona la solución general con dos puntos de intersección entre dos círculos IP & IP' como se muestra en la figura 3.1:

Las intersecciones sólo son viables en dos círculos si no se producen en las condiciones siguientes:

$$dist = ||C2 - C1||$$

- Si $dist > r1+r2$, los círculos están muy separados y no se intersecan.
- Si $dist < \text{abs}(r1-r2)$, entonces un círculo está dentro de otro y no hay intersección posible.
- Si $dist = 0$ & $r1=r2$, los círculos son iguales o están uno encima del otro y las intersecciones infinitas.

Las condiciones anteriores no proporcionan ninguna solución para dos círculos, por lo tanto, para que el cálculo de la intersección tenga éxito, cualquier proceso que calcule la intersección de círculos debe pasar por dichos criterios.

Capítulo 4

Diseño

Este capítulo presenta el diseño y los componentes clave de nuestro sistema de localización en interiores con LoRa 2.4Ghz y responde a varias preguntas como, por ejemplo, cómo podemos diseñar un sistema de este tipo, cuáles serán los requisitos previos para el sistema y qué factores pueden afectar al rendimiento del sistema. Antes de implementar nuestro sistema, debemos asegurarnos del rendimiento de alcance de los dispositivos LoRa. Para ello, examinamos la configuración del transceptor con diferentes parámetros de modulación LoRa (presentados en el capítulo 3).

Además, hay que tener en cuenta que, en un entorno interior, no es habitual tener los dispositivos siempre en LoS, especialmente en edificios corporativos, casas, hospitales, etc. Dado que existen posibles obstáculos con paredes, puertas y objetos de interior, es necesario examinar los efectos sobre el alcance tanto en entornos LoS como NLoS.

En general, en el sistema de localización en interiores, hay dos funciones diferentes, la movilidad y los anclajes. La localización en LoRa requiere identificadores únicos para trabajar con el intercambio de paquetes de localización especiales y la validación de solicitudes de localización en el motor de localización. Por tanto, se necesita un mecanismo para proporcionar los ID al dispositivo móvil. Así que introducimos un tercer papel llamado "dispositivo central" para conseguir esta funcionalidad para el sistema.

Para ello, planteamos dos sistemas diferentes, uno para la evaluación y otro para la localización, y definimos también los roles y componentes necesarios antes y durante la ejecución del sistema, que pueden verse en la figura 4.7.

Además, necesitamos una plataforma para visualizar la preevaluación y los datos específicos de localización. Este aspecto puede definirse como la post-ejecución del sistema, es decir, una interfaz gráfica en la que podamos ver la ejecución en directo del sistema de localización y la ubicación determinada del nodo móvil.

En las secciones siguientes se detallan los diseños de los sistemas para lograr la localización en interiores - ization System.

4.1 Modos LoRa y configuración

Los dispositivos LoRa pueden funcionar con varios modos como LoRa, Ranging, BLE, GFSK, etc. La funcionalidad del sistema puede lograrse con los modos LoRa normal y Ranging. Antes de realizar cualquier operación, los dispositivos deben configurarse en el modo de funcionamiento deseado. Un dispositivo no puede trabajar simultáneamente con distintos modos, por lo que las operaciones deben ser secuenciales con respecto al modo. Otro aspecto es configurar los dispositivos con los parámetros LoRa óptimos (frecuencia, BW, SF y CR), que se tratan ampliamente en el capítulo 3. Para que la comunicación entre dispositivos LoRa tenga éxito, estos parámetros deben ser los mismos entre todos los dispositivos LoRa, independientemente de su modo de funcionamiento.

En el modo de funcionamiento normal de LoRa, los dispositivos pueden simplemente transmitir y recibir paquetes con carga útil. En el modo de alcance, los dispositivos intercambian paquetes especiales entre el maestro y el esclavo de para realizar únicamente operaciones específicas de alcance.

4.2 Sistema de evaluación de alcance

El objetivo principal de este trabajo de tesis es evaluar la posición de un dispositivo móvil utilizando LoRa. El rendimiento del sistema se basa completamente en la eficiencia con la que el dispositivo realiza el ranging. Como el motor de alcance proporcionado por Semtech realiza el alcance entre los ID únicos asignados a los dispositivos LoRa y se denominan Maestro y Esclavo. Así que el diseño consiste en dos dispositivos LoRa, uno actuando como maestro y otro como esclavo. Anteriormente, en el capítulo 3, analizamos los parámetros asociados a LoRa y descubrimos que LoRa puede funcionar con varias combinaciones de sus parámetros, a saber, frecuencia, factor de dispersión, ancho de banda y tasa de codificación. Por tanto, el diseño debe iterar sobre cada combinación y realizar un mínimo de 100 operaciones de alcance en cada iteración y recopilar las distancias evaluadas.

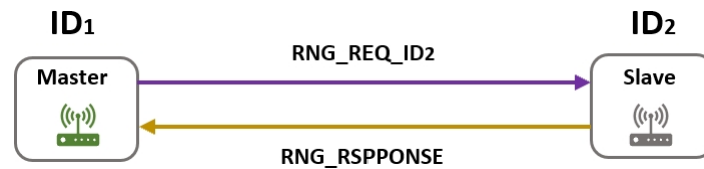


Figura 4.1: Dispositivos maestro y esclavo realizan una operación de alcance. La flecha púrpura emite una solicitud de rango para el dispositivo esclavo en ID2 (ID de esclavo), y el esclavo responde con una respuesta de rango al maestro con la flecha amarilla.

4.2.1 Configuración y entorno previos a la evaluación

Para la configuración, colocamos los dispositivos separados a una distancia deseada para evaluar el funcionamiento con dispositivos LoRa. Elegimos una distancia real al suelo deseada para tener una situación más realista en un entorno de interior. Además, para obtener resultados significativos, debemos tener en cuenta las condiciones habituales de un entorno interior. Como el entorno interior suele tener obstáculos con paredes, puertas, objetos reflectantes, objetos de interior, etc. Por lo tanto, la evaluación debe llevarse a cabo tanto en entornos LoS como NLoS.

Colocación del dispositivo

Colocamos un par de dispositivos LoRa en dos esquinas diferentes del edificio a una cierta distancia, cada uno asignado con su ID único. Aquí, el papel de los ID no es sólo diferenciar los dispositivos, sino también que el motor de alcance de Semtech emita la solicitud de alcance para un ID especificado. En la figura 4.1 se muestra cómo el dispositivo que tiene el ID acepta la solicitud y devuelve la respuesta al dispositivo que inició la solicitud, es decir, el dispositivo maestro.

- LoS (Línea de visión).
- NLoS (Non Line-of-Sight).

Entorno LoS

En la Figura 4.2, lo más probable es que los dispositivos estén presentes en la misma sección d e l edificio, colocados a 20 metros de distancia y puedan tener contacto directo. Los dispositivos casi no tienen obstáculos entre ellos. Tener un entorno LoS hace que las ondas de radio lleguen al destino más fácil y rápidamente.

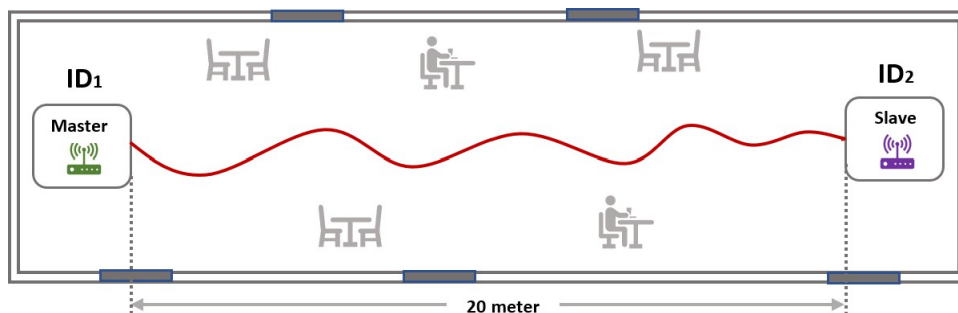


Figura 4.2: Dispositivos Maestro y Esclavo realizan ranging en LoS. Diferentes IDs discriminan el par.

Entorno NLoS

En la figura 4.3, los dispositivos se colocan a 20 metros de distancia en diferentes secciones del edificio y no tienen contacto directo y, por lo tanto, las ondas de radio viajan a través de diferentes caminos a través de reflexiones de las paredes, y los objetos presentes en el medio ambiente y las ondas de radio llegan al destino con un retraso en comparación LoS.

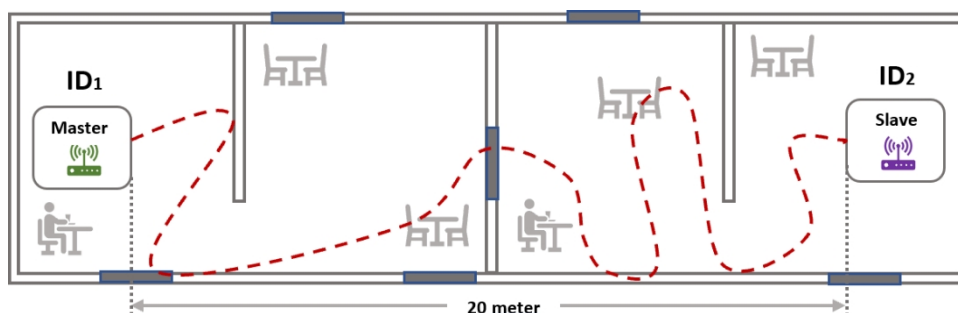


Figura 4.3: Dispositivos maestro y esclavo realizan el ranging en NLoS. Diferentes IDs discriminan el par.

Las figuras 4.2 y 4.3 ilustran el comportamiento de las ondas de radio en dos entornos diferentes. Las ondas de radio que viajan con retardo producirían un valor de distancia estimado mayor que el entorno sin obstáculos. Por lo tanto, es necesario estudiar estas diferencias para obtener la mejor combinación de parámetros LoRa.

4.2.2 Procedimiento de ejecución

La ejecución del sistema comienza con la configuración de los dispositivos con sus parámetros de modulación iniciales para una primera comunicación satisfactoria. Para la recepción y transmisión normal de paquetes, los dispositivos se configuran con el modo LoRa. El sistema debe evaluar cada combinación de parámetros LoRa, por lo que iteramos cada combinación posible (mencionada en el Capítulo 3) y realizamos un proceso de comunicación Pre-ranging. La figura 4.5 representa la ejecución de este subproceso. Este proceso da como resultado un acuse de recibo del dispositivo esclavo. Al recibir un acuse de recibo, damos un paso adelante con

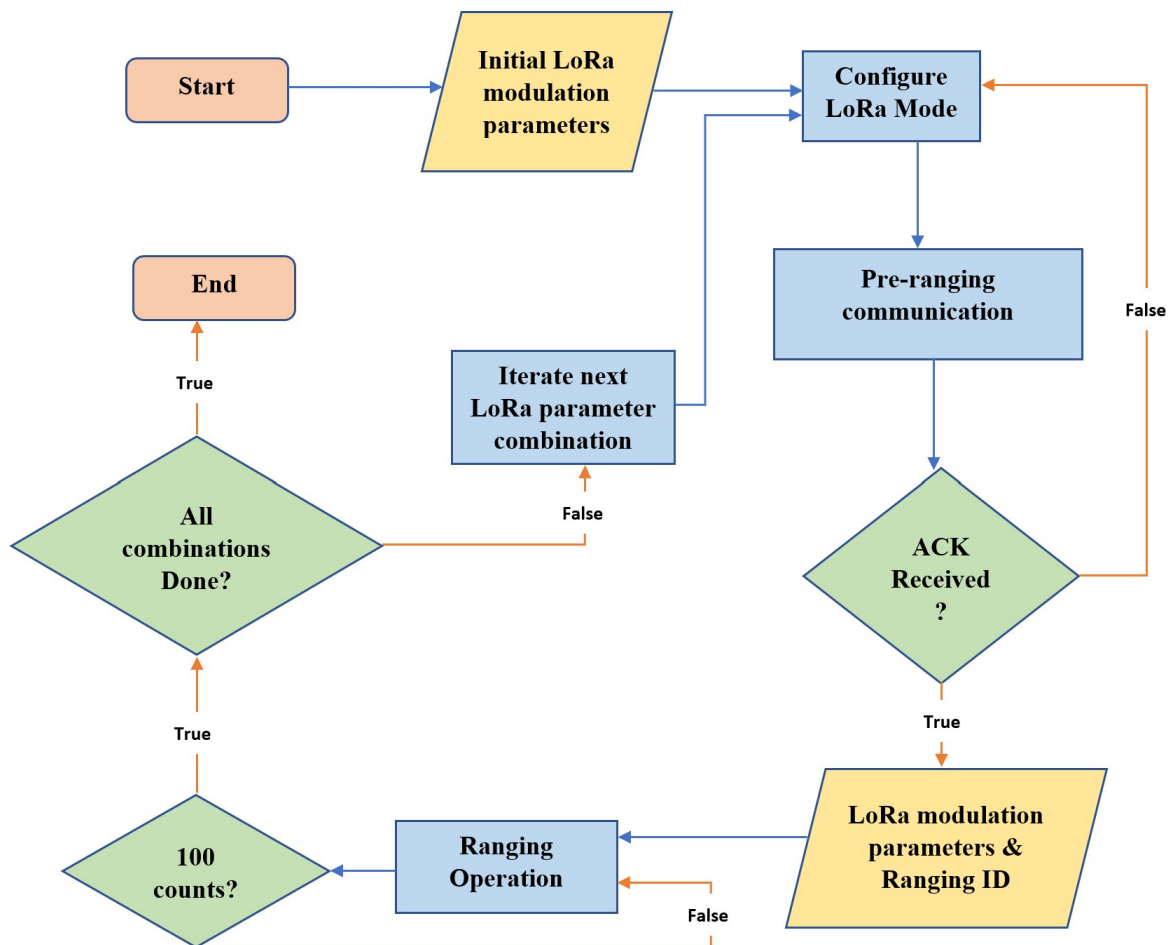


Figura 4.4: Diagrama de flujo que ilustra la ejecución completa del Sistema de Evaluación. Las flechas azules representan el flujo procedimental y las flechas naranjas el flujo condicional.

la combinación iterada actual de parámetros LoRa e iniciar la operación de Ranging. La ejecución de este proceso se describe en la figura 4.6. Para una evaluación, necesitamos una cantidad significativa de muestras de alcance. Por lo tanto, hacemos un bucle sobre Ranging Operation hasta alcanzar 100 muestras. La ejecución del sistema termina con la iteración de las últimas combinaciones posibles de parámetros LoRa. En la figura 4.4 se describe la secuencia completa de ejecución del sistema.

En el proceso completo, el dispositivo maestro es la unidad de control del sistema, que

desencadena todos los eventos. El esclavo sólo acepta un comando específico al recibir un paquete del maestro y realiza la operación correspondiente.

Los dos subprocesos mencionados tienen su propio papel en el sistema. El primero implica el intercambio de información que contiene parámetros LoRa para preparar el dispositivo para la operación de Ranging. Y en el segundo proceso, los dispositivos realizan la operación de Ranging. A continuación se describen ambos subprocesos.

Comunicación previa

En este proceso, los dispositivos intercambian los parámetros LoRa, es decir, el factor de dispersión y el ancho de banda. Inicialmente, los dispositivos deben operar con los mismos parámetros para mantener la comunicación viva y sincronizada en el proceso de intercambio de paquetes. El maestro inicializa y envía el paquete que contiene la información de los parámetros LoRa al esclavo con CHNG_PARAMS_PKT para la operación de alcance y reconfigurarse con parámetros actualizados. Simultáneamente, el Esclavo debe ponerse en Modo Recepción para

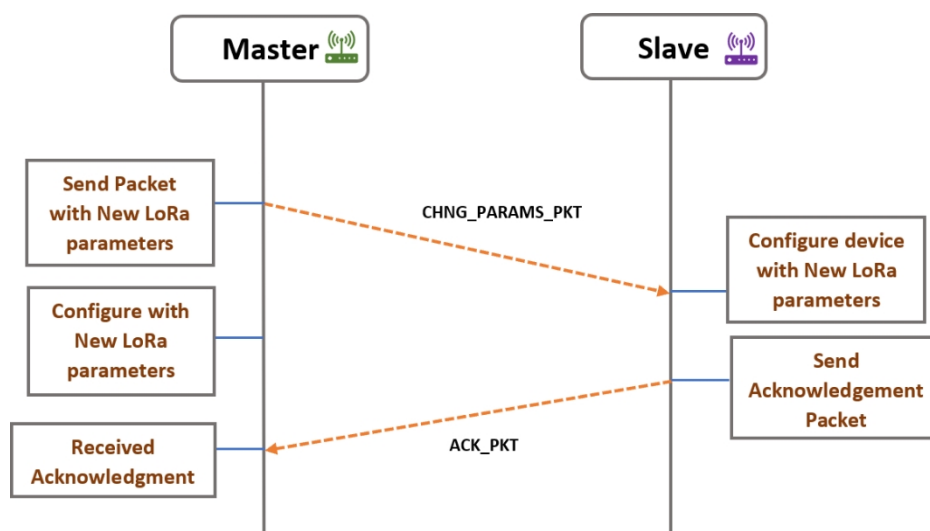


Figura 4.5: Diagrama temporal de dispositivos que intercambian parámetros LoRa. Las flechas naranjas representan el envío y la recepción de paquetes entre el maestro y el esclavo.

recibir información sobre los parámetros. El esclavo procesa el paquete y actualiza sus parámetros de acuerdo con el paquete recibido. Y devuelve una respuesta con ACK_PKT (acuse de recibo) al maestro y cambia el modo a Ranging.

Operación de telemetría

El proceso de alcance implica la configuración de los parámetros LoRa y la asignación de un ID único tanto al esclavo como al maestro. Así pues, el proceso comienza con la configuración de LoRa en modo ranging con parámetros LoRa y la asignación de un ID a los dispositivos. Este ID único puede intercambiarse en el proceso de comunicación previo al ranging si no se ha elegido intencionadamente. Cualquiera de los dispositivos debe establecer el ID de otro dispositivo para evitar ambigüedades. A continuación, el esclavo debe ponerse en modo de recepción de alcance para poder aceptar

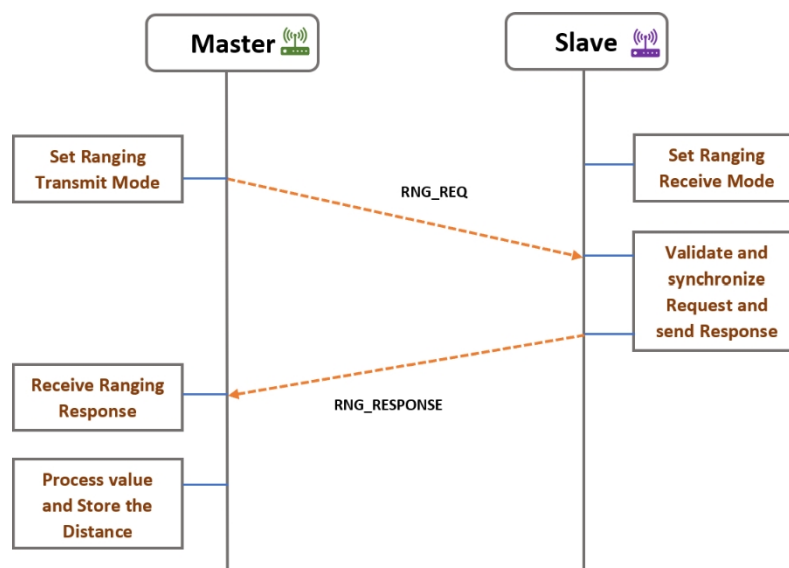


Figura 4.6: Diagrama temporal de los dispositivos que realizan la operación Ranging. Las flechas naranjas representan el intercambio especial de paquetes de alcance entre el dispositivo maestro y el esclavo.

cualquier solicitud de alcance. Ahora, un dispositivo maestro puede iniciar una solicitud de alcance. Después de iniciar la solicitud de alcance, se inicia un proceso interno en el motor de alcance de ambos dispositivos. En el capítulo 2 se describe el funcionamiento de este motor. Tras la operación de alcance, la distancia medida está disponible en el dispositivo maestro y puede almacenarse para su visualización o procesamiento posterior.

4.3 Sistema de localización en interiores

4.3.1 Arquitectura del sistema

En general, el diseño del sistema de localización en interiores consiste en anclas, un nodo móvil y una técnica de localización. Hemos discutido muchas técnicas de localización (en el Capítulo 2), y elegimos la multilateración para realizar ajustes con las evaluaciones de alcance llevadas a cabo en el paso anterior. Para utilizar esta técnica, necesitamos un mínimo de 3 nodos de anclaje en ubicaciones conocidas y cada uno de ellos con sus propios ID de alcance únicos. en la descripción completa del diseño, nos referimos al dispositivo LoRa como nodo. Para poder realizar el alcance y la localización, el nodo móvil debe tener el ID de alcance y la ubicación de cada nodo ancla. Por lo tanto, debemos introducir una nueva entidad llamada master, que posee los ID y las coordenadas de los nodos ancla y también será responsable de comunicarse con el nodo móvil cada vez que se inicie una solicitud de ranging. La arquitectura del sistema completo se muestra en la figura 4.7, donde el nodo móvil emite su posición evaluada, lo que significa que los procedimientos de localización son realizados por el propio nodo móvil.

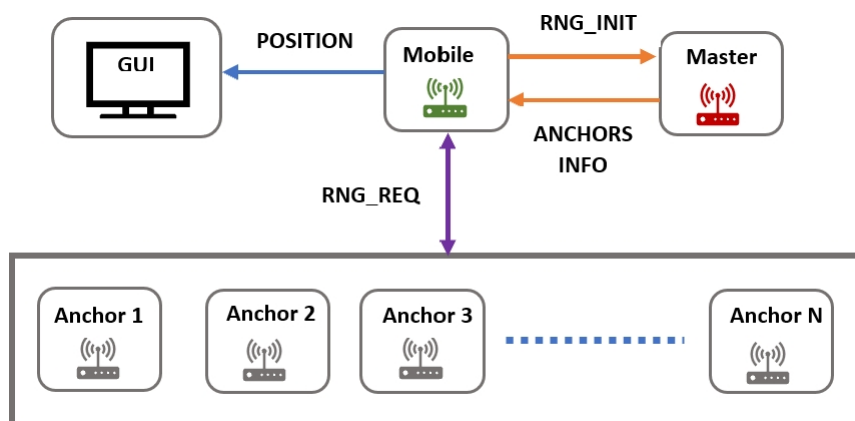


Figura 4.7: Los distintos componentes del sistema de localización en interiores y sus conexiones. Ilustra un conjunto de anclas, un dispositivo móvil y un dispositivo maestro. Las flechas naranjas representan el intercambio de datos de prelocalización, la flecha morada para realizar el ranging, y la flecha azul que pasa la posición estimada por UART.

4.3.2 Funciones asociadas del sistema

El diseño de nuestro Sistema de Localización en Interiores consiste en tres Roles diferentes. Cada rol tiene su propio flujo de control y son independientes en su comportamiento de ejecución individual. Sin embargo, la secuencia de ejecución en el sistema completo ilustra su importancia y sus subprocesos significativos para alcanzar el clímax del sistema. En las siguientes secciones, describimos el flujo de trabajo de los roles individuales.

Maestro

Sin embargo, el sistema de localización requiere sólo dos entidades, una es el móvil (a localizar) y otra es el ancla. El sistema requiere que el nodo móvil conozca la información de los anclajes. Por lo tanto, el nodo maestro se enriquece con toda la información disponible de los anclajes, es decir, Ranging ID y Position (coordenadas bidimensionales). El nodo siempre tiene que permanecer pasivamente activo en el modo de recepción LoRa y nunca participa en el proceso de alcance. El nodo es responsable de aceptar las solicitudes de inicialización de alcance del nodo móvil. Cuando recibe estas peticiones, envía una respuesta con información sobre las anclas en diferentes paquetes. Y al final envía un paquete que dice, toda la información enviada. Vuelve al modo de recepción y espera las solicitudes de alcance.

Ancla

El nodo ancla comienza configurando el Modo de Ranging LoRa y, posteriormente, se establece en el Modo de Recepción de Ranging y espera las solicitudes de ranging en su ID único. Cada vez que el nodo recibe una solicitud de alcance, el motor de alcance valida la solicitud y devuelve la respuesta. El control comienza de nuevo y espera las nuevas peticiones.

Móvil

El nodo móvil se comunica con ambas entidades, maestro y anclas. El nodo comienza configurándose inicialmente con el Modo LoRa y prepara el paquete "Ranging Initialization" y lo difunde en el sistema y pasa al Modo Recepción. Si hay un maestro escuchando la petición, entonces el nodo Móvil recibirá la información de los Anclas. El nodo sigue escuchando hasta que recibe un paquete final del maestro con "Toda la información enviada". Después, el nodo pasa al modo Ranging si ha recibido información de tres o más anclas. En caso contrario, vuelve a iniciar el proceso. Ahora, el control itera sobre cada ID de ancla e inicia una solicitud de alcance en el ID de ancla, realiza la operación de alcance y recoge las distancias medidas. Ahora, el control estima la ubicación pasando las distancias y la Ubicación de las p osiciones de Ancla al Algoritmo de Localización y estima la Ubicación y pasa la ubicación al Universal Asynchronous Receiver Trasnmittter (UART). El proceso se repite a partir de la evaluación de la ubicación del nodo.

4.3.3 Preparación y colocación de los nodos

Como hemos descrito anteriormente, para localizar un objeto, el sistema requiere una base o unas posiciones de referencia a considerar en un espacio bidimensional. Podemos establecer un sistema de localización en un espacio medido. Por lo tanto, introducimos una matriz de anclas (mínimo tres números) y colocamos esos nodos en ubicaciones específicas conocidas en un sistema de coordenadas bidimensional para construir un entorno espacial bidimensional para el sistema. Nos aseguramos de colocar los anclajes en distintas esquinas del espacio del sistema a determinadas distancias entre sí para lograr un posicionamiento eficaz. El sistema también tiene un nodo maestro, que debe estar en el rango de comunicación del espacio del sistema para poder comunicarse con el nodo móvil cada vez que éste inicie una solicitud de alcance. Básicamente, un nodo maestro contiene toda la información necesaria sobre los anclajes, que son necesarios para que un nodo móvil obtenga la posición. Un nodo móvil será localizado si está presente en el espacio del sistema. Por lo tanto, también es necesario que un nodo móvil esté presente en el espacio del sistema.

4.3.4 Procedimiento de ejecución

El proceso de ejecución se completa en dos partes: la primera es el proceso de intercambio de datos y la segunda es la realización de operaciones de alcance y localización del dispositivo. La primera parte consiste en la comunicación entre el nodo móvil y el nodo maestro en modo LoRa normal, mientras que la segunda es la comunicación de alcance entre el nodo móvil y los nodos de anclaje disponibles. El intercambio de datos es necesario en el sistema ya que el algoritmo de localización será realizado por el nodo móvil y el algoritmo requiere la ubicación de los anclajes para estimar relativamente la posición después de ejecutar la operación de alcance con cada nodo. En las secciones siguientes se describe la secuencia de ejecución de dos subpartes del sistema .

4.3.5 Proceso de prelocalización

El proceso comienza con la inicialización de los parámetros de modulación LoRa elegidos a partir del resultado del Sistema de Evaluación de Ranging y la configuración de los dispositivos en modo LoRa. El nodo maestro contiene los Anchor IDs y sus localizaciones, y esta información sólo es requerida por el nodo móvil. Por lo tanto, este proceso tiene lugar entre el nodo maestro y el móvil. Una vez que ambos nodos están configurados en modo LoRa, el nodo móvil inicia la solicitud RNG_INIT y pasa al modo de recepción iniciando un temporizador. El nodo maestro acepta la solicitud y comienza a enviar la información de las anclas al nodo móvil. Si el nodo móvil recibe toda la información de las anclas, inicia el proceso siguiente. Si el nodo móvil no recibe todas las anclas o nada del maestro, vuelve a iniciar la solicitud después de un tiempo de espera y el proceso comienza de nuevo.

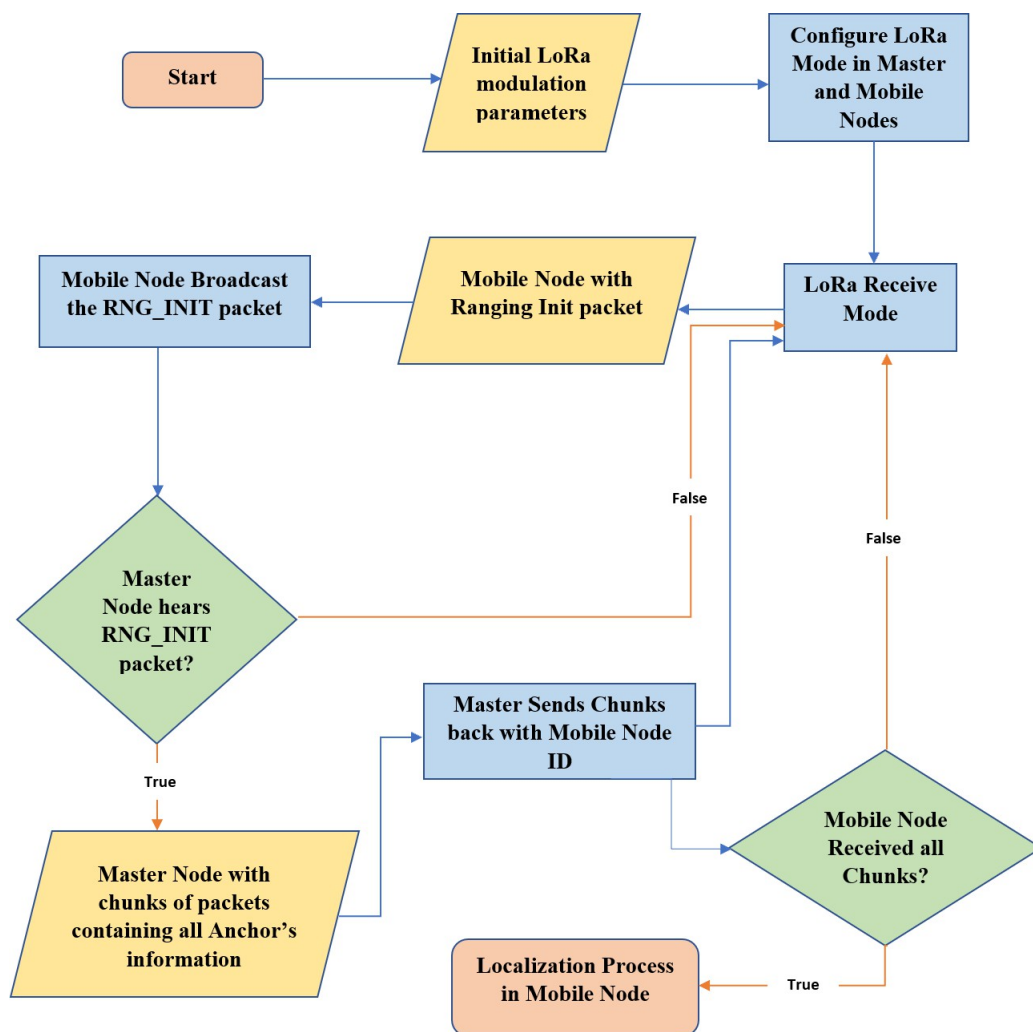


Figura 4.8: Diagrama de flujo de control del proceso de prelocalización. Las flechas azules representan el flujo de control regular y las flechas naranjas representan el flujo condicional en el sistema.

4.3.6 Alcance y localización

En el proceso completo de localización en interiores, el sistema debe funcionar con la misma configuración de parámetros LoRa y, por lo tanto, no cambiamos el parámetro de modulación y también procedemos para el modo Ranging con los mismos parámetros de modulación LoRa. El papel del nodo maestro se completa en el proceso anterior y, por lo tanto, este proceso implica la ejecución del proceso sólo en los nodos móviles y anclas. Tanto las entidades Móviles como las Anclas están configuradas en Modo Ranging LoRa. Puesto que hay tres o más anclas en el sistema, el proceso itera sobre todas las anclas con sus IDs una por una y realiza el alcance con cada ancla. Si el alcance es exitoso con tres o más anclas, entonces el sistema realiza la Localización usando el método de Multilateración con distancias recolectadas. En el paso final, la localización estimada es transferida a la UART para el proceso de visualización. Y el proceso continúa en bucle para realizar de nuevo el ranging y las operaciones subsiguientes, y actualiza la localización en la UART.

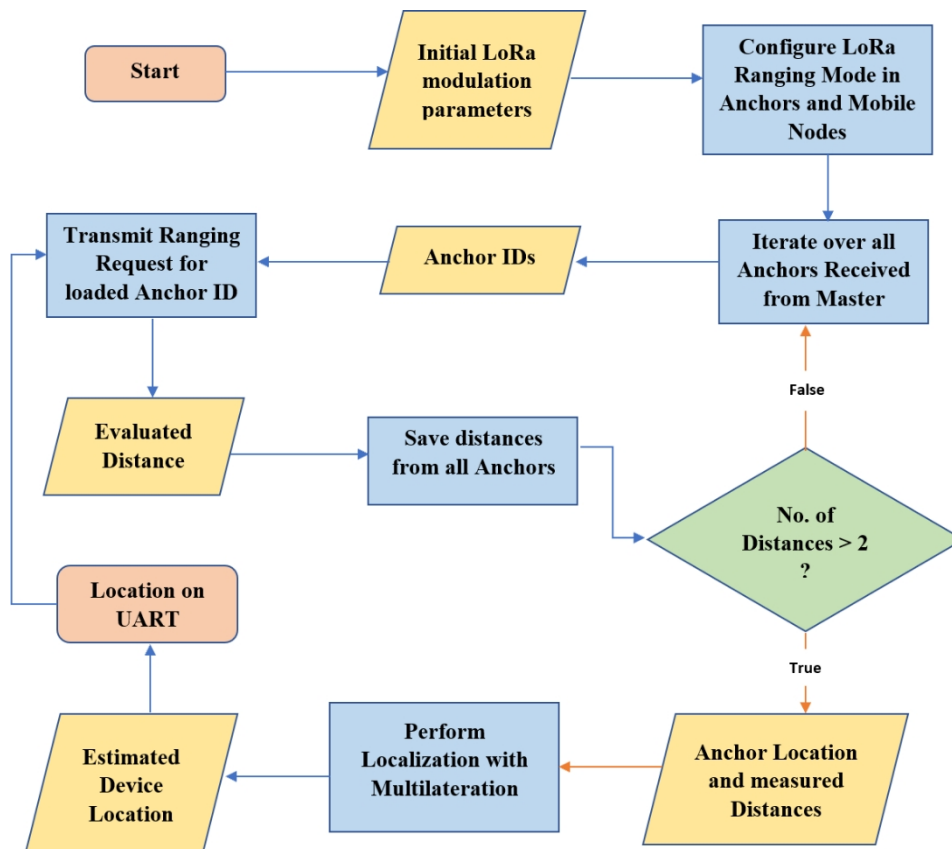


Figura 4.9: Diagrama de flujo de control del proceso de alcance y localización. Las flechas azules representan el flujo de control regular y las flechas naranjas representan el flujo condicional en el sistema.

4.3.7 Algoritmo de localización

El algoritmo estima la ubicación del nodo en tres pasos. En primer lugar, considera las distancias estimadas del proceso de alcance como radios de círculos y evalúa todos los puntos de intersección de los círculos. En segundo lugar, filtra los puntos innecesarios con un mecanismo de control de eficiencia. Por último, evalúa el centroide de los puntos filtrados. Y el centroide se considera como Localización Estimada. A continuación se describe el algoritmo completo en el Listado 4.1 con respecto a la Figura 4.10. En el listado 4.1, el algoritmo

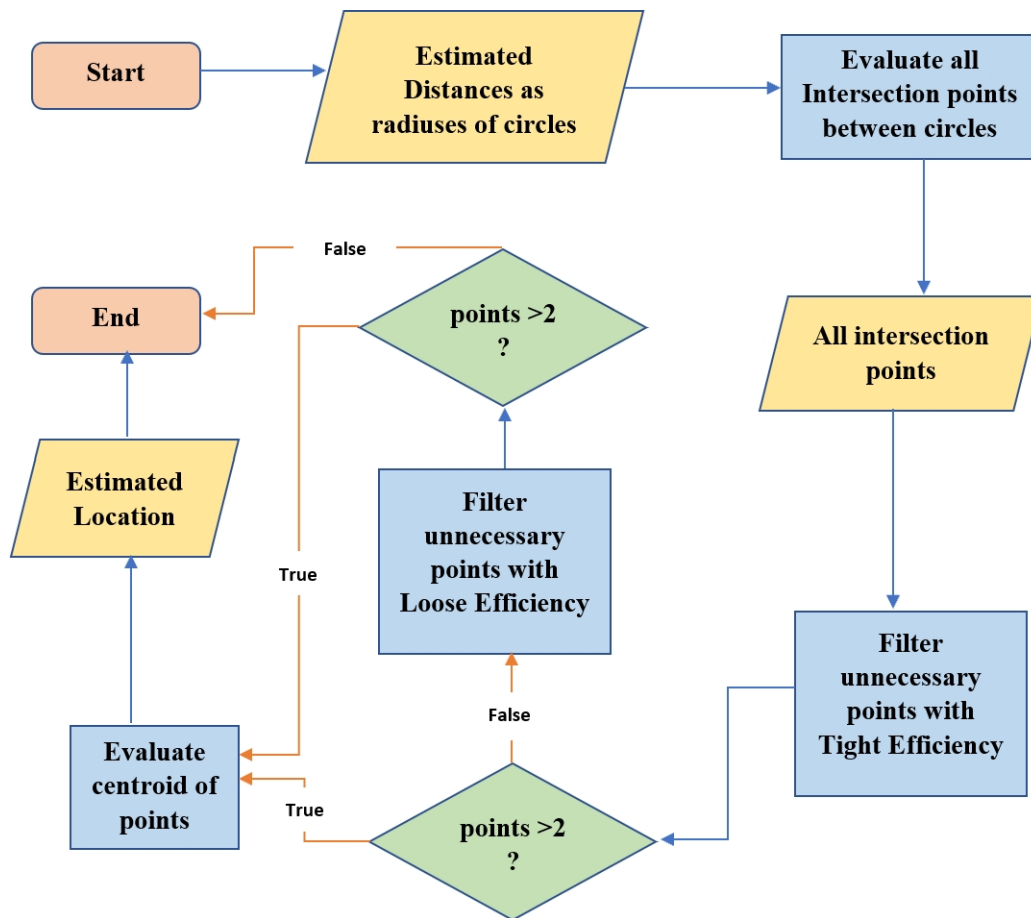


Figura 4.10: Diagrama de flujo de control del algoritmo de localización. Las flechas azules representan el flujo de control regular y las flechas naranjas representan el flujo condicional en el sistema.

consta de dos tareas principales, a saber, el proceso de filtrado y la estimación del centroide. Tras evaluar todos los puntos de intersección, hay que aplicar criterios de filtrado para eliminar las intersecciones irrelevantes. Los criterios se basan en la eficiencia estricta y la eficiencia laxa. Con la eficiencia ajustada, el proceso de filtrado considera la selección de los puntos de intersección que están cubiertos por todos los círculos, mientras que con la eficiencia holgada, el proceso considera la selección de los puntos de intersección que están cubiertos por un círculo menos de todos los círculos y, por tanto, disminuye la eficiencia. A continuación, el algoritmo evalúa el centroide de todos los puntos filtrados realizando la suma promediada de todos los puntos de intersección y obtiene el centroide como ubicación del dispositivo.

```
ips := get_all_intersection_points() eficacia :=  
ajustada  
pepitas_filtradas := puntos_de_intersección_filtrada(pepitas,  
eficacia) recuento := longitud(pepitas_filtradas)  
if (count > 2) then  
    localización := calcular_centroide(ip_filtrada)  
si no  
    eficacia := flojo  
    puntos_de_intersección_filtrados :=  
    puntos_de_intersección_filtrados(puntos_de_intersección, eficacia)  
    if (count > 2) then  
        localización := calcular_centroide(ip_filtrada)  
    si no  
        ubicación := NULL  
lugar de devolución
```

Listado 4.1: Representación algorítmica del Algoritmo de Localización.

Capítulo 5

Aplicación

En este capítulo analizamos la implementación del diseño que presentamos en el capítulo anterior. Comenzamos presentando los componentes básicos de hardware y software. También demostramos la integración de los componentes para alcanzar nuestros objetivos de diseño. Por último, explicaremos cómo realizamos el diseño propuesto y sus procedimientos.

5.1 Hardware

Reunimos diferentes componentes de hardware para empezar a realizar las operaciones deseadas. Dado que los transceptores LoRa funcionan ejecutando varios comandos en función de sus tareas, necesitamos una máquina host que proporcione dichos comandos al transceptor LoRa. Por lo tanto, el hardware se puede utilizar en un par de transceptor y máquina host.

5.1.1 LoRa 2,4 GHz

El chipset LoRa SX1280 de Semtech es un transceptor que utiliza la especificación LoRa de 2,4 GHz y ofrece funciones de alcance mediante un motor de alcance incorporado. El transceptor SX1280 es un dispositivo operado por comandos que actúa como un dispositivo esclavo y requiere un host para proporcionar comandos. El SX1280 soporta las interfaces Serial Peripheral Interface (SPI) y UART para aceptar comandos de la máquina anfitriona. La figura 5.1 muestra la placa DLP-RFS1280 que tiene montado el chipset LoRa SX1280. Es un dispositivo de bajo coste y fácilmente disponible que proporciona una interfaz SPI para la comunicación con la máquina anfitriona.



Figura 5.1: Placa DLP-RFS1280 montada con transceptor SX1280 [30].

5.1.2 La unidad microcontroladora anfitriona (MCU)

Utilizamos la placa Nordic Board nRF52840DK (mostrada en la figura 5.2) como máquina anfitriona para proporcionar comandos operativos al módulo LoRa SX1280. Incluye un nRF52840

System on Chip (SoC) que tiene un ARM Cortex-M4 de 32 bits que funciona a 64 MHz de frecuencia de oscilación. La placa incorpora 1 MB de memoria flash interna y 256 KB de memoria interna. Puede ampliar la memoria disponible desde la memoria externa integrada. El kit de desarrollo tiene un depurador integrado para facilitar el proceso de desarrollo del firmware. La placa viene con varios puertos SPI y uno de ellos se puede utilizar para conectar el SX1280.

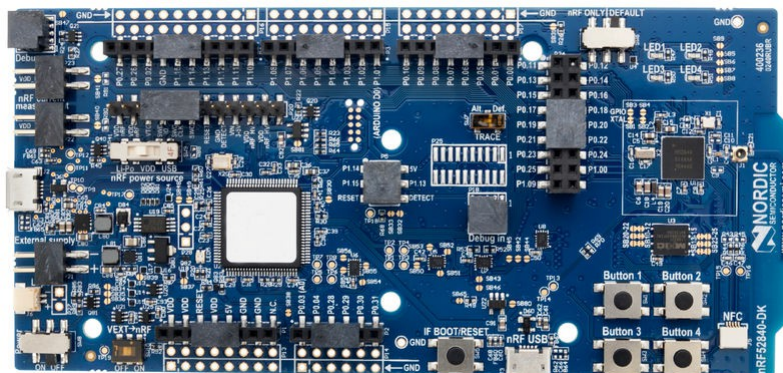


Figura 5.2: La placa Nordic Board nRF52840DK [31].

5.2 Sistema operativo

Para el soporte de software, utilizamos Zephyr OS. Ya hemos comentado en el capítulo 2 que Zephyr es un sistema operativo en tiempo real (RTOS) pequeño y ligero que proporciona bibliotecas integradas y soporta múltiples arquitecturas de hardware. Los servicios como multithreading, gestión de interrupciones, asignación dinámica de memoria, gestión de energía, etc. lo convierten en una solución ideal. Implementa el acceso a la funcionalidad de las bibliotecas a través de la interfaz API. Soporta la arquitectura del procesador nRF52840. El núcleo de este RTOS requiere una descripción del hardware, que se realiza mediante archivos fuente Devicetree (dts). El árbol de dispositivos describe los diferentes componentes del hardware e implementa la estructura de propiedades. Esta propiedad amplía las características posteriores [32]. Un archivo .yaml contiene diferentes propiedades que puede tener un componente. Además, la propiedad representa un dispositivo cuyos pines están conectados a los pines de Entrada/Salida de Propósito General (GPIO) de su respectivo componente.

5.3 Integración de LoRa

5.3.1 Conexión de SX1280

Para nuestra implementación, programamos el nRF52840DK para que ejecute una secuencia de operaciones. Además, ampliamos el hardware añadiendo el dispositivo SX1280 LoRa al nRF52840DK. Conectamos el transceptor SX1280 a través de la interfaz SPI. Y para establecer una conexión para RTOS, necesitamos modificar el nodo SPI en el árbol de dispositivos. Como se describe en el Listado 5.1, especifica los respectivos pines a utilizar para el puerto SPI 1. Aunque, la placa nRF52840 ofrece tres puertos SPI, nos ceñimos a

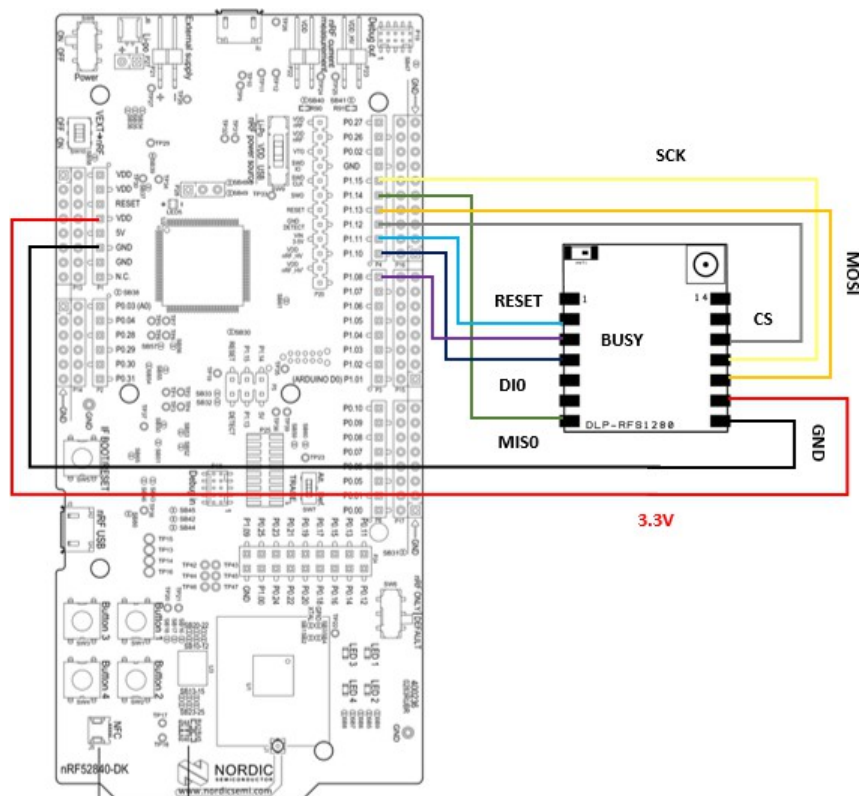


Figura 5.3: Conexión física entre el nRF52840DK y el transceptor SX1280.

puerto 1. Ahora, creamos una propiedad LoRa que se conectará internamente a la dirección del pin respectivo utilizando la especificación devicetree. Después configuramos diferentes subpropiedades en LoRa para utilizar otros pines relacionados con interrupciones y monitorización del estado del dispositivo. A continuación, especificamos un archivo superpuesto devicetree en el que utilizamos la propiedad LoRa y especificamos las respectivas direcciones de pin utilizando las especificaciones devicetree. La figura 5.3 presenta la conexión física del transceptor SX1280 a la port 1 de la placa nRF52840DK. Las señales SPI Chip Select (CS), Master-Out Slave-In (MOSI), MOSI y Serial Clock (SCK) están conectadas a P1.12, P1.13, P1.14 y P1.15 respectivamente. La señal asignada a los cuales indica el estado del dispositivo si éste aún está en ejecución del comando anterior. Por último, asignamos BUSY, DIO y RESET a P1.10, P1.08 y P1.11. Ahora, describimos la funcionalidad específica de cada pin conectado al puerto 1.

- La señal Master-Out Slave-In (MOSI) se utiliza para enviar datos del maestro al esclavo,
- una señal Master-In Slave-Out (Master-In Slave-Out (MISO)) se utiliza para enviar datos del esclavo al maestro,
- una señal Serial Clock (SCK) para la sincronización del reloj,
- una señal Chip Select (CS) para activar la comunicación entre maestro y esclavo,
- a La señal BUSY se introduce en el maestro con el estado si el esclavo sigue en ejecución,
- una señal Digital Input Output (DIO) es una señal de interrupción al maestro desde el esclavo
- se utiliza una señal RESET para reiniciar el dispositivo esclavo

```
/ {  
    alias {  
        lora0 = &lora;  
    };  
};  
  
&spi1 {  
    sck-pin = <47>;  
    miso-pin = <46>;  
    mosi-pin = <45>;  
    cs-gpios = <&arduino_header 16 GPIO_ACTIVE_LOW>;  
  
    lora: sx1280@0 {  
        compatible = "semtech,sx1280";  
        reg = <0>;  
        label = "sx1280";  
        reset-gpios = <&arduino_header 15 GPIO_ACTIVE_LOW>; dio-  
        gpios = <&arduino_header 14 GPIO_ACTIVE_HIGH>; busy-gpios =  
        <&arduino_header 13 GPIO_ACTIVE_HIGH>; spi-max-frequency =  
        <1000000>;  
        power-amplifier-output = "pa-boost";  
    };  
};
```

Listado 5.1: Archivo superpuesto Devicetree que define la conexión del SX1280 al puerto SPI1 del nRD52840DK [33].

5.3.2 Rangos LoRa

Aquí explicamos el mecanismo de código que permite al dispositivo definir los roles Maestro y Esclavo con IDs y realizar operaciones de alcance. Zephyr proporciona una funcionalidad de controlador LoRa en forma de API a través de un archivo de cabecera, que incluimos en nuestro código fuente. Estas API abstraen la implementación real del transceptor LoRa. Para utilizar la API, debemos inicializar el dispositivo de radio LoRa con referencia al devicetree. A continuación, creamos un puntero al dispositivo y definimos los parámetros LoRa como la frecuencia, el ancho de banda, el factor de propagación, la tasa de codificación y la potencia en una estructura de configuración.

Ahora, podemos configurar el modo del dispositivo a Ranging Mode. Dentro de esto, también especificamos el respectivo ID de alcance y Rol para el dispositivo. El dispositivo que transmite el rango debe tener el rol de Maestro y el dispositivo que recibe el rango debe tener el rol de Esclavo. Ahora, el dispositivo está preparado para realizar operaciones de alcance. Cada vez que recibimos o transmitimos el ranging, la función correspondiente también necesita el puntero del dispositivo y un tiempo de espera. Aquí, también tenemos una opción para especificar el ID de la función de ranging. La función para transmitir el ranging espera la respuesta y devuelve una estructura que contiene el estado del ranging, el valor de la distancia medida y el valor RSSI. La función de recepción permanece en modo de recepción hasta que se agota el tiempo de espera o si se recibe alguna solicitud de alcance.

5.4 El sistema de localización en interiores

En esta sección, explicaremos la estructura del código para el Sistema de Localización en Interiores que realiza la estimación de la localización utilizando tres entidades diferentes, a saber, maestro, ancla y móvil. Para el desarrollo del firmware, utilizamos Zephyr OS. El código para el firmware y los drivers en Zephyr están escritos en lenguaje C. Incluso con la limitación de que el lenguaje C no admite clases ni objetos, Zephyr ofrece acceso a las bibliotecas a través de la interfaz API y proporciona un entorno fácil para el programador. Además, también ilustramos scripts comúnmente utilizados por entidades maestras y móviles, que están programados en C con Zephyr OS. Para la visualización de la ubicación, utilizamos un ordenador host que ejecuta un script en Python.

El código completo del sistema de localización en interiores está disponible en:
github.com/ashokvaishnav708/IndoorLocalizationLoRaProject

5.4.1 Operaciones y estructura de la carga útil

```
// Operaciones
#define RANGING_INIT 0x00
#define RECEIVE 0x05 #define
START_RANGING 0x07 #define
ALL_DONE_PKT 0x06 #define
ANCHOR_PKT 0x10 #define
CORNER_PKT 0x12 #define NONE
0xFF

struct __atributo__(( empaquetado )) Coordenadas
{
    bool flag; // Coordenadas validadas si TRUE sino no validadas
    float x;
    float y;
};

struct __attribute__(( empaquetado )) Carga útil
{
    uint32_t host_id;
    uint8_t operación;
    struct Coordenadas coords;
};
```

Listado 5.2: Conjunto común de código para Maestro y Móvil.

5.4.2 Maestro

El Maestro contiene información de todas las Anclas disponibles en el sistema. La información, como el ID de anclaje y las coordenadas. El Maestro siempre está configurado para

Modo LoRa, en el que sólo puede enviar y recibir paquetes y, por lo tanto, nunca participa en el proceso de ranging. La ejecución comienza con la inicialización del dispositivo LoRa SX1280. A continuación, el control asigna los parámetros de modulación LoRa como la frecuencia, el factor de dispersión, el ancho de banda y la tasa de codificación para LoRa-config. A continuación, a través de la API, lora_config se configura el modo LoRa normal. Tras la configuración del modo, el control entra en el bucle infinito. En el bucle, cada operación se selecciona sobre la base de declaraciones de conmutación en la variable de operación local. Por defecto, el dispositivo está configurado en Modo Recibir. Cada vez que recibe una operación RANGING_INIT con carga útil, el control guarda el request_id e inicializa la información de las esquinas y anclas de la configuración de prueba en la carga útil y las difunde (envía) una a una en diferentes trozos. Por último, prepara la carga útil con ALL_DONE_PKT con el request_id guardado y emite un acuse de recibo al dispositivo del que recibió la solicitud. Por último, el control vuelve al modo de recepción y espera nuevas solicitudes.

5.4.3 Ancla

Las Anclas son dispositivos autónomos, que están activamente listos para realizar operaciones de recepción de alcance dentro de su inicio. El Ranging ID del Anchor es el ID convertido de 32 bits del dispositivo host. La ejecución comienza con la recopilación del ID de alcance del dispositivo host. A continuación, el control procede a inicializar el dispositivo LoRa SX1280 con los parámetros de modulación LoRa. A continuación, el control configura el dispositivo LoRa en modo Ranging como esclavo y le asigna el ID de Ranging. El control entra en el bucle infinito y configura el dispositivo LoRa en modo Ranging Receive. Cada vez que se recibe una solicitud de alcance en el ID de alcance especificado, el dispositivo realiza la respuesta de alcance y el control vuelve al bucle y espera más solicitudes de alcance.

5.4.4 Móvil

El dispositivo móvil implementa la lógica completa de estimación de la ubicación del dispositivo. El nodo móvil salta entre dos modos diferentes de LoRa. Inicialmente, cuando recoge la información del anclaje y, posteriormente, cuando realiza las operaciones de alcance. La ejecución comienza cuando el dispositivo móvil se asigna a sí mismo un ID de 32 bits. A continuación, el control procede a inicializar el dispositivo LoRa SX1280 con los parámetros de modulación LoRa. A continuación, el control configura el dispositivo LoRa en modo LoRa para transmitir y recibir paquetes normales. El control entra en el bucle infinito que tiene declaraciones de conmutación en la variable de operación local. Por defecto, el dispositivo está configurado en Modo Recibir, con 1 segundo de tiempo de espera. Cada vez que se produce el timeout, a la variable de operación se le asigna la operación RANGING_INIT. A continuación, el control pasa por encima del bucle y cambia al caso RANGING_INIT. En este caso, el dispositivo prepara la carga útil con la operación RANGING_INIT y su ID de 32 bits. A continuación, el dispositivo difunde los paquetes, pasa al MODO RECEPCIÓN y espera durante 1 segundo las respuestas de la configuración de prueba y la información del anclaje. En caso de que no reciba nada del maestro, el proceso vuelve a comenzar una vez transcurrido el tiempo de espera. El dispositivo implementa una cola dinámica en una estructura de lista enlazada para almacenar la información del ancla y tiene una variable de distancia que puede almacenar la distancia medida a través de la operación de alcance. Una vez recibida toda la información de las anclas, el dispositivo cambia al modo Ranging mediante START_RANGING.

y realiza el alcance con cada ancla. Aquí, podemos de-finir el recuento de muestras para realizar el número de alcance con cada nodo de acuerdo con el recuento de muestras y tomamos la suma media de cada muestra de alcance con éxito como nuestra distancia estimada (metros). Ahora, el control procede al Algoritmo de Localización y estima la ubicación si hay un mínimo de 3 anclas exitosas en el rango y hace un bucle en el proceso de rango y localización.

5.5 Algoritmo de localización

El algoritmo de localización se basa en un enfoque de multilateración, en el que primero estimamos un área de superposición específica y el centroide del área se considera una ubicación estimada. Como se muestra en la Figura 5.4, el algoritmo comienza con la iteración de la lista de colas de Anchor una a una de forma anidada para calcular los puntos de intersección entre cada círculo formado por la distancia estimada como radio. El algoritmo implementa una cola dinámica en estructura de lista enlazada para almacenar los puntos de intersección. Cuando hay un punto de intersección duplicado, la cola no permite añadir ese punto. Por lo tanto, el algoritmo es robusto frente a la redundancia de datos. Ahora, el siguiente paso

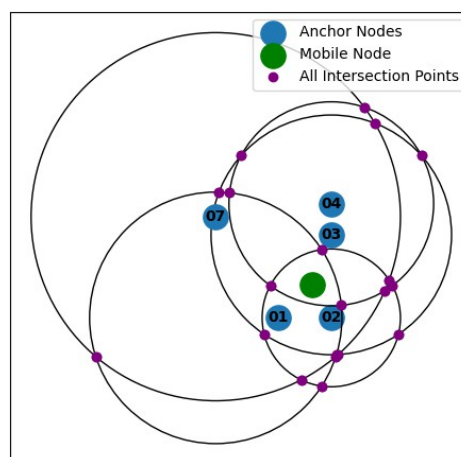


Figura 5.4: Intersección de todos los círculos y sus puntos de intersección.

es filtrar todos los puntos de intersección innecesarios y obtener un polígono, es decir, considerar sólo los puntos que forman la sección común solapada. Esto se hace mediante el criterio `error_factor`. El criterio también define el mecanismo de eficiencia del algoritmo, a saber, eficiencia ajustada y eficiencia holgada. Si el `factor_error` es 0, se trata de una eficiencia ajustada, en la que el algoritmo filtra sólo los puntos que están dentro de todos los círculos. Por el contrario, si el `factor_error` es 1, se trata de una eficiencia floja, en la que el algoritmo filtra los puntos que están dentro de $N-1$ círculos, siendo N el número total de círculos disponibles. La figura 5.5 muestra las intersecciones filtradas con `eficiencia ajustada`.

Ahora, tras el proceso de filtrado, el punto central de la sección solapada se considera la ubicación estimada, es decir, el centroide del polígono. Se evalúa como la suma media de los puntos de intersección filtrados. La Figura 5.6, presenta el punto estimado exactamente en el nodo móvil.

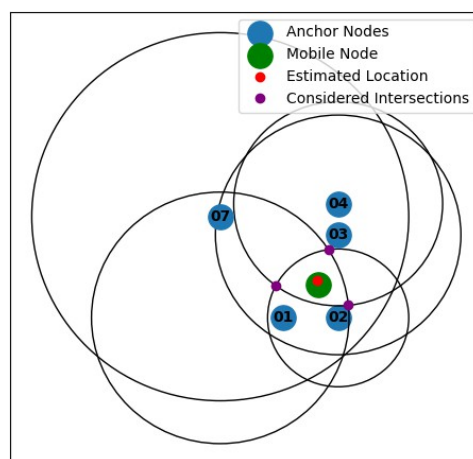
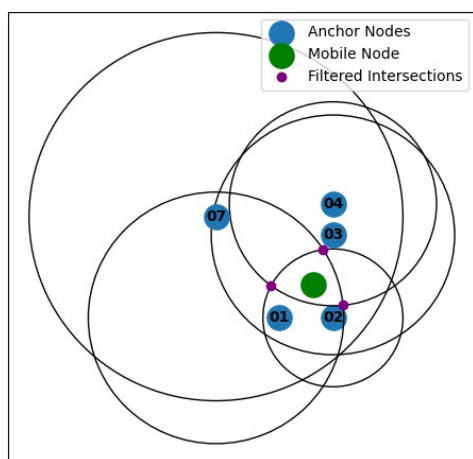


Figura 5.5: Puntos de intersección filtrados. **Figura 5.6:** Ubicación estimada.

Capítulo 6

Evaluación

En este capítulo, discutiremos los resultados del Sistema de Evaluación de Alcance y del Sistema de Localización en Interiores. En general, discutimos dos escenarios para el sistema, es decir, entorno LoS y NLoS. Aquí, distinguimos entre estos dos escenarios en los que colocamos nuestros dispositivos ejecutando sus tareas deseadas y evaluamos el rendimiento del alcance para cada combinación de parámetros LoRa. Con tres anchos de banda diferentes y seis combinaciones distintas de factores de dispersión, configuramos dispositivos Maestro y Esclavo y realizamos un mínimo de 100 operaciones de alcance entre ellos, manteniéndolos a 20 metros de distancia entre sí. Siempre fijamos la tasa de codificación en 4/5 con 2445000000 Hz (espectro de 2,4 GHz) de frecuencia. Además, discutiremos los resultados obtenidos en nombre del Sistema de Evaluación de Ranging. Para el sistema de localización en interiores, colocaremos varios nodos en lugares fijos medidos y crearemos un mapa base o una configuración de banco de pruebas. Discutiremos varios aspectos que afecta al rendimiento global del sistema y a la calidad de la localización estimada.

6.1 LoRa como receptor

El comportamiento del módulo LoRa como receptor permite a los dispositivos escuchar los paquetes entrantes independientemente de su modo configurado. Por lo tanto, para resolver el problema de la escucha, los dispositivos LoRa devuelven un registro IRQ_STATUS de 8 bits. Su valor define qué tipo de paquetes se han recibido con valores de filtro predefinidos. Su valor también verifica si el paquete se ha recibido correctamente o no. Se puede aplicar un filtro para comprobar si el paquete recibido es un paquete RNG_REQ o un paquete normal. Con RNG_REQ, puede aplicarse un filtro para verificar si la solicitud se emite para el ID de este dispositivo o no. Y se encarga del proceso de validación y descarte de los paquetes ranging.

6.2 Sistema de evaluación de alcance

Antes de finalizar la metodología de nuestro sistema de localización en interiores, realizamos algunos experimentos teniendo en cuenta el entorno general de interiores, es decir, el medio ambiente, y comprobamos la precisión con la que los dispositivos realizan los rangos. La precisión es buena cuando los valores se aproximan a la realidad. LoRa SX1280 puede funcionar con varios parámetros de modulación, como la frecuencia, el ancho de banda, el factor de propagación y la tasa de codificación. Los parámetros, ancho de banda y factor de propagación afectan principalmente a los retrasos en la recepción y transmisión de paquetes, lo que implica una variación en la medición de la distancia. En un entorno interior suele haber muchos objetos, puertas y cristales, por lo que no siempre se trata de un escenario LoS. Procedemos a realizar experimentos en dos escenarios diferentes, LoS y NLoS con diferentes combinaciones de parámetros LoRa y el resultado con los parámetros LoRa óptimos para Indoor Ranging.

6.2.1 Línea de visión (LoS)

La Tabla 6.1 muestra los valores de distancia medida LoRa con varias combinaciones de parámetros LoRa en el escenario LoS a 20 metros de la verdad real sobre el terreno. Creamos un gráfico tridimensional como se muestra en la figura 6.1, que representa una visión general del error de distancia entre la distancia medida LoRa y la distancia real. Con una visión general, podemos adivinar que en el escenario LoS, la mayoría de las combinaciones de parámetros realiza el sobre-rango con 20 metros de distancia real.

| 20 m | 400 kHz | 800 kHz | 1600kHz |
|-------------|---------|---------|---------|
| SF5 | 27.67 | 27.53 | 33.48 |
| SF6 | 26.23 | 29.52 | 37.11 |
| SF7 | 25.42 | 28.71 | 37.18 |
| SF8 | 28.21 | 31.23 | 33.19 |
| SF9 | 27.67 | 30.15 | 26.95 |
| SF10 | 24.78 | 32.40 | 22.10 |

Tabla 6.1: Muestras de distancia estimada con diferentes combinaciones de BW y SF en LoS a 20 metros de distancia real.

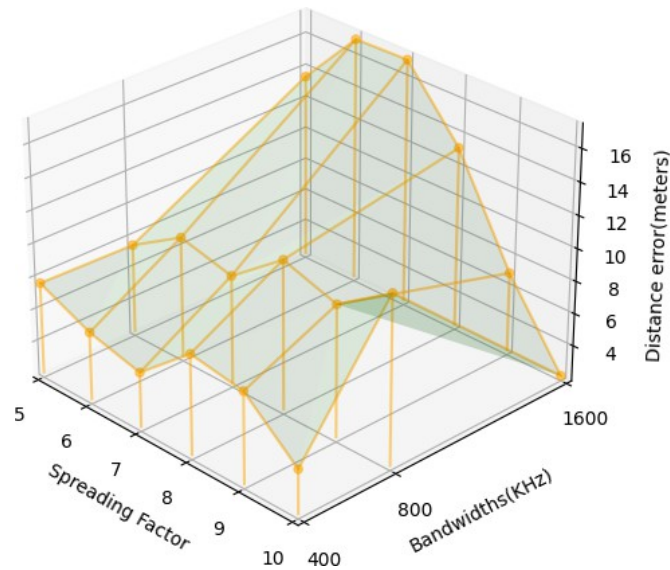


Figura 6.1: Representación gráfica general tridimensional del error de distancia con respecto a las combinaciones de ancho de banda y factor de dispersión en el escenario LoS.

Observando el gráfico de ancho de banda individual, observamos que con BW 400KHz & 800KHz, la tasa de error es superior a 5 metros. Una combinación óptima será la que tenga un error de distancia cercano al valor 0. Como podemos ver en la figura 6.1, hay una combinación con BW 1600KHz & SF 10 que se acerca bastante a cero y tiene una distancia medida de 22.1 metros. Por lo tanto, consideramos los parámetros BW 1600KHz & SF 10 LoRa como los óptimos para el ajuste de LoS.

6.2.2 Sin línea de visión directa (NLoS)

La Tabla 6.2 muestra los valores de distancia medida LoRa con varias combinaciones de parámetros LoRa en el escenario NLoS a 20 metros de la verdad real sobre el terreno. Del mismo modo, en el caso de prueba LoS, creamos un gráfico tridimensional similar como se muestra en la figura 6.2, que también representa la visión general del error de distancia entre la distancia medida LoRa y la distancia real. Con esta visión de conjunto, podemos adivinar que en la configuración NLoS, hay algunas combinaciones de parámetros para realizar el sub-ranging con 20 metros de distancia real.

| 20 m | 400 kHz | 800 kHz | 1600kHz |
|-------------|---------|---------|---------|
| SF5 | 31.91 | 23.61 | 34.32 |
| SF6 | 28.75 | 28.80 | 40.20 |
| SF7 | 27.04 | 31.73 | 39.77 |
| SF8 | 22.98 | 34.93 | 34.16 |
| SF9 | 13.07 | 33.62 | 25.96 |
| SF10 | 6.535 | 13.47 | 17.35 |

Tabla 6.2: Muestras de distancia estimada con diferentes combinaciones de BW y SF en NLoS a 20 metros de distancia real.

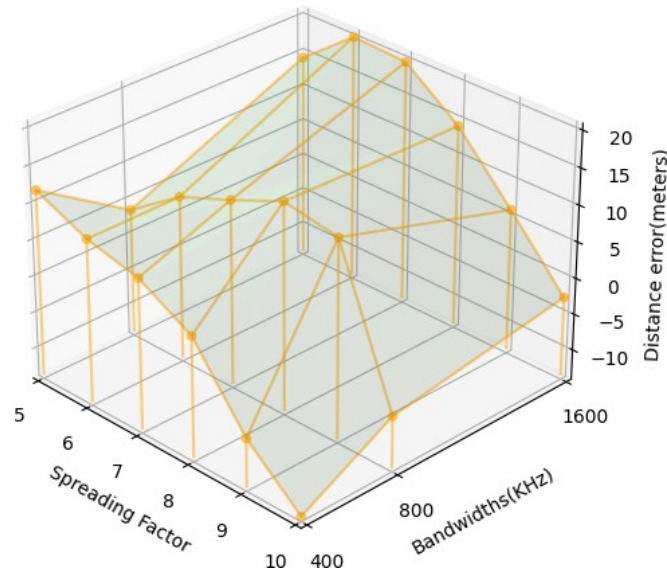


Figura 6.2: Representación gráfica general tridimensional del error de distancia con respecto a las combinaciones de ancho de banda y factor de dispersión en el escenario NLoS.

Con un punto de vista similar para el gráfico individual evaluado NLoS, observamos que con BW 400KHz & 800KHz, la tasa de error es superior a 5 metros o inferior a 0. Una combinación óptima será la que tenga un error de distancia cercano al valor 0. Como podemos ver en la figura 6.2, hay una combinación con BW 1600KHz & SF 10 que es lo suficientemente cercana a cero y tiene una distancia medida de 17,35 metros. Como podemos ver en la figura 6.2, hay una combinación con BW 1600KHz & SF 10 que está suficientemente cerca de cero y ha medido una distancia de 17.35 metros. Por lo tanto,

también para el escenario NLoS, consideramos los parámetros BW 1600KHz & SF 10 LoRa como los óptimos para el escenario LoS.

6.2.3 Comparación breve de LoS y NLoS

En los escenarios LoS y NLoS, encontramos una combinación óptima común de parámetros LoRa, es decir, BW 1600KHz y SF 10. Pero con este parámetro óptimo común, los escenarios LoS y NLoS tienen factores de error diferentes. Pero con este parámetro óptimo común, los escenarios LoS y NLoS tienen factores de error diferentes. Para LoS, el factor de error es 2,10 y para NLoS es -2,65, por lo que puede haber posibilidades de que se produzcan situaciones de cobertura excesiva o insuficiente cuando se prueban los parámetros LoS con la configuración NLoS y viceversa.

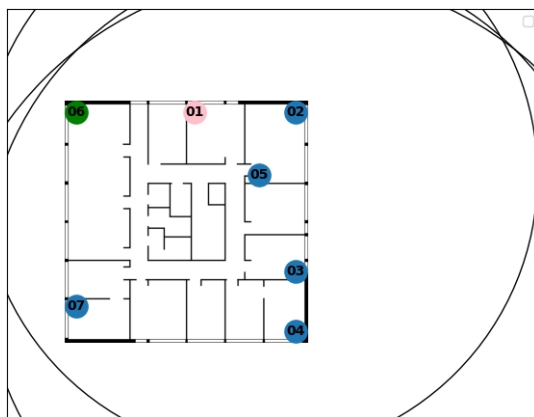


Figura 6.3: Prueba de alcance con nodo en escenario NLoS. El punto verde representa el nodo maestro y los puntos azules los anclas.

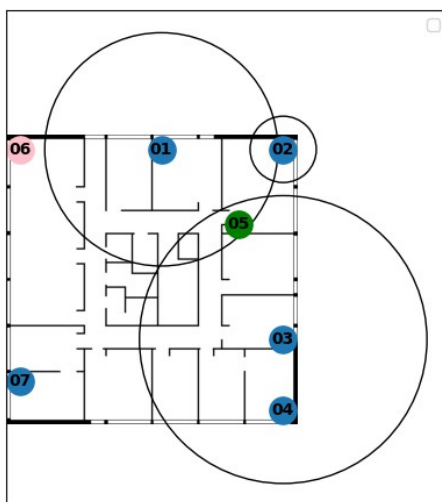


Figura 6.4: Prueba de alcance con nodo en escenario LoS. El punto verde representa el nodo maestro y los puntos azules los anclas.

Las figuras 6.3 y 6.4 muestran la prueba de alcance y demuestran la situación antes mencionada de exceso de alcance y falta de alcance para LoS y NLoS en sus escenarios complementarios. Descubrimos que la combinación óptima de parámetros LoRa evaluada no ofrecía un alcance adecuado para entornos interiores.

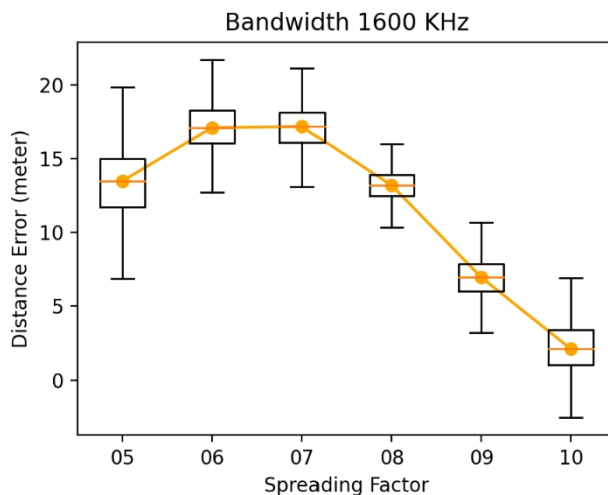


Figura 6.5: SFs con BW 1600KHz.

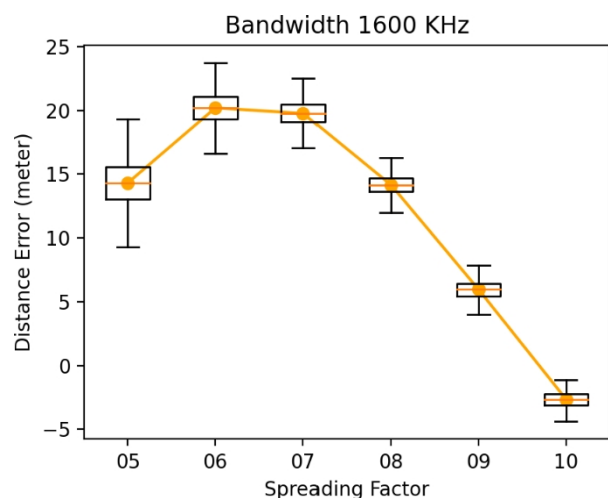


Figura 6.6: SFs con BW 1600KHz.

Ahora, hacemos una breve comparación para la evaluación y volvemos a comprobar las cifras 6.1 y 6.2 para LoS y NLoS. Vemos que ninguno de los valores de distancia es exactamente igual a la distancia real y, por lo tanto, los rangos con SX1280 LoRa no garantizan la precisión. Aún así, podemos buscar precisión y fiabilidad basándonos en comparaciones de similitud de forma eficiente. En las figuras 6.5 y 6.6 observamos que el ancho de banda 1600KHz con SF 09 tiene los factores de error más parecidos y distancias similares sin diferencias significativas para los escenarios LoS y NLoS. Por lo tanto, actualizamos la combinación óptima de parámetros LoRa a BW 1600KHz y SF 09.

6.3 Sistema de localización en interiores

Como ya hemos comentado en el capítulo 4, el sistema de localización puede probarse en base a los resultados óptimos del sistema de evaluación de alcance. Ahora, tenemos la combinación óptima de parámetros LoRa en la que observamos un comportamiento similar de los dispositivos. Nuestras pruebas posteriores se realizarán teniendo en cuenta la combinación óptima de parámetros LoRa, es decir, BW 1600KHz y SF 09. Un sistema de localización requiere una configuración de prueba real en un entorno interior para funcionar. En esta sección, veremos la configuración del dispositivo y la precisión y calidad de la localización con diferentes escenarios. Además, también discutiremos las dependencias del sistema.

6.3.1 Configuración del sistema

El sistema de localización en interiores requiere una configuración de base que debe tener un mínimo de tres nodos de anclaje LoRa colocados en la ubicación conocida y un nodo maestro en el rango de comunicación. Por lo tanto, necesitamos un banco de pruebas con nodos situados a distancias físicas medidas. La Figura 6.7 muestra el plano del banco de pruebas con diferentes nodos situados a distancias fijas y medidas. Los nodos visibles están configurados con módulos LoRa conectados a sus respectivas MCU anfitrionas. Los nodos azules representan todos los nodos Anchor disponibles, el nodo rosa representa un nodo maestro y el nodo verde es el nodo móvil (nodo a localizar). No obstante, los roles de los nodos pueden cambiarse para la evaluación de diferentes casos de prueba. Todas las evaluaciones posteriores se realizarán con la configuración del banco de pruebas (Figura 6.7) para nuestro sistema de localización en interiores.

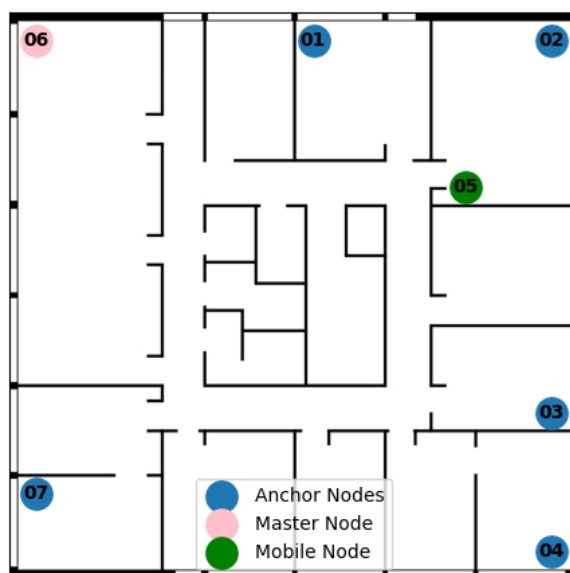


Figura 6.7: Plano del banco de pruebas de la Universidad de Kiel.

6.3.2 Calidad de alcance

La localización de un nodo depende de lo bien que se haya realizado el ranging. Además, una localización se estima bien si hay un número máximo de círculos que participan en la intersección y se solapan. Y más puntos de intersección implica más datos, lo que ayuda al algoritmo de multilateración a estimar una buena localización. Por lo tanto, analizamos la localización basada en la calidad del alcance realizado por los dispositivos.

Buen alcance

Se dice que el alcance es bueno cuando el nodo móvil estima la distancia igual o lo suficientemente cerca de la distancia real. Como se muestra en la figura 6.8, el nodo 05 es el nodo móvil y realiza el alcance con los nodos 01, 02 y 03. Los valores de distancia estimados de los anclajes en este caso están muy cerca de las distancias reales respectivas al nodo móvil (nodo 05). Los valores de distancia estimados de los Anclajes en este caso son muy cercanos a las respectivas distancias reales al nodo Móvil (nodo 05). Por lo tanto, la localización estimada mostrada con el punto rojo es muy prometedora.

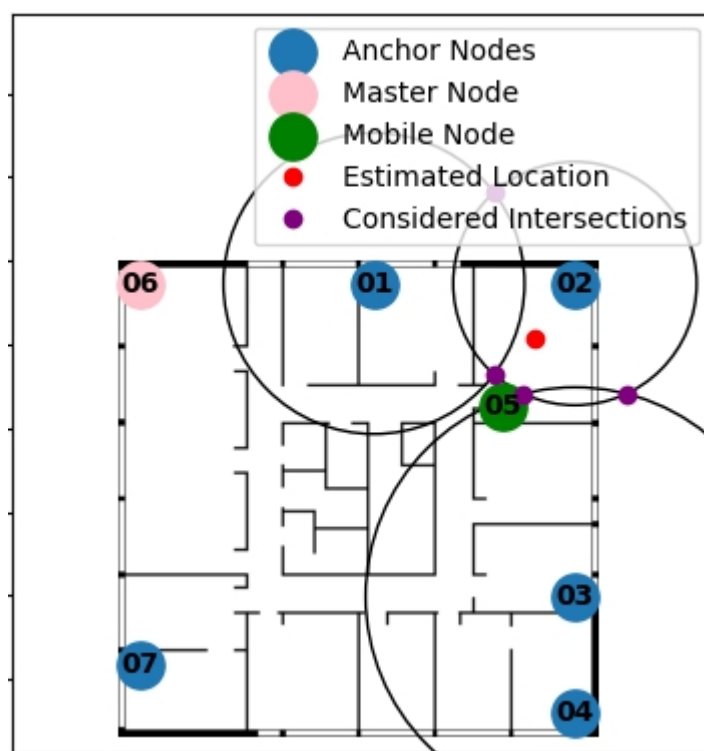


Figura 6.8: Ejemplo de situación de buen alcance.

Mal alcance

Un mal alcance se refiere a la situación en la que no se realiza un alcance adecuado entre los dispositivos y los círculos formados con sus distancias como radios no se cruzan en absoluto. Como se muestra en la Figura 6.9, intentamos de nuevo realizar la localización con una situación similar a la de la sección anterior, y observamos que las distancias evaluadas no estaban ni siquiera cerca del nodo móvil y, por lo tanto, no se intersecaban los círculos. El algoritmo sólo funciona cuando tiene puntos de intersección con un mínimo de tres círculos,

ya que hay dos puntos de intersección entre dos círculos que se cruzan y existe una ambigüedad entre elegir el uno entre dos puntos de intersección. El escenario mostrado en la figura anterior resultará sin localización.

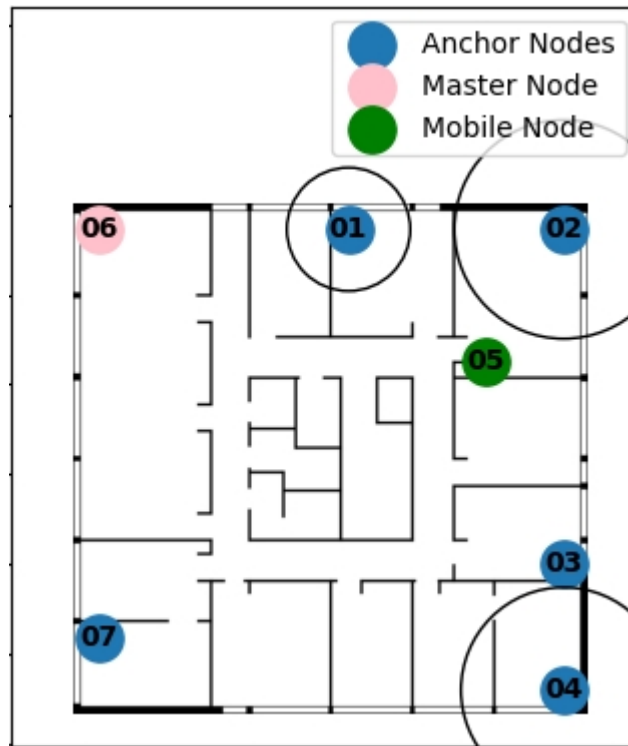


Figura 6.9: Un ejemplo que ilustra una situación de Bad Ranging.

6.3.3 Control de la eficiencia

El algoritmo de multilateración incorpora un mecanismo de control de la eficiencia, en el que la tasa de error define dos eficiencias diferentes, a saber, eficiencia ajustada y eficiencia holgada. En el capítulo 5 se explica el funcionamiento del mecanismo de control de la eficiencia, que es clave para el proceso de filtrado de los puntos de intersección. Con la eficiencia ajustada, se consideran los puntos de intersección que están comúnmente presentes en todos los círculos y la eficiencia holgada considera los puntos de intersección presentes en uno menos que el número máximo de círculos y por lo tanto, elige más puntos de intersección y pierde poca eficiencia. La eficiencia ajustada y holgada se define por $\text{error-rate}=0$ y $\text{error-rate}=1$ respectivamente.

Eficiencia ajustada

En la Figura 6.10, estamos tratando de localizar el nodo 04 y sólo tres puntos de intersección (de color púrpura) son elegidos para evaluar la ubicación y estima la ubicación (de color rojo) que está muy cerca del nodo 04. Estos puntos de intersección son seleccionados por el proceso de filtro con $\text{error-rate}=0$ lo que significa que los puntos seleccionados se encuentran en todos los círculos formados por las distancias estimadas con los respectivos Anclajes.

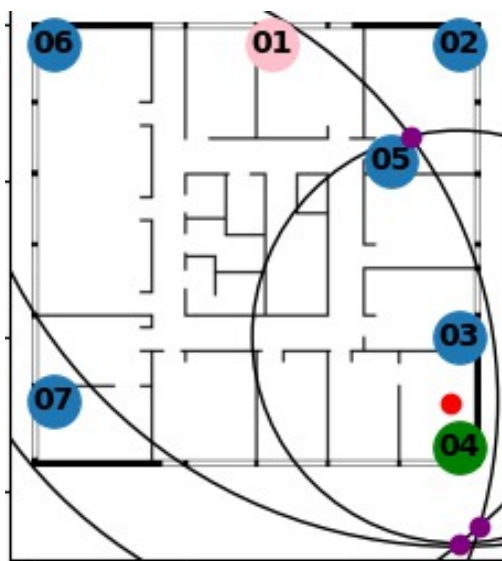


Figura 6.10: Localización con eficiencia ajustada

Eficiencia floja

En la Figura 6.11, consideramos el mismo caso y los mismos datos, pero esta vez con intentamos localizar el nodo 04 con eficiencia Floja, es decir, $\text{error-rate}=1$. Observamos que hay más puntos de intersección elegidos por el proceso de filtrado ya que con eficiencia Floja el proceso de filtrado también considera los puntos que también están bajo un círculo menos como con eficiencia Tensa. Observamos que hay mas puntos de interseccion que son elegidos por el proceso de filtrado como con Loose efficiency el proceso de filtrado tambien considera los puntos que estan bajo un circulo menos como con Tight efficiency. Como resultado, la localización estimada (punto de color rojo) se aleja ligeramente del nodo 04. Incluso con la eficiencia floja, el algoritmo proporciona una localización estimada prometedora.

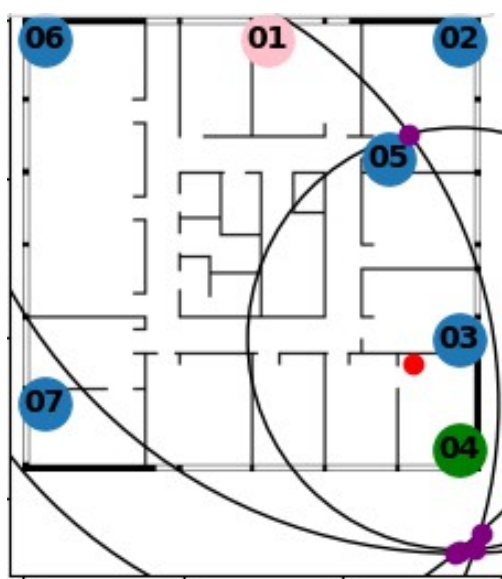


Figura 6.11: Localización con eficacia holgada

6.3.4 Eficacia del algoritmo en distintos casos

Caso 1: El mejor de los casos

En la Figura 6.12, el alcance realizado por el nodo 05 con Anclas es ligeramente superior a la distancia real, lo que significa que habrá una situación de solapamiento de círculos. El algoritmo del sistema filtró los puntos de intersección y dio como resultado tres puntos de intersección restantes, que definen el área de solapamiento común. Por lo tanto, el algoritmo estima la ubicación exactamente en la posición real del nodo. La combinación de una distancia ligeramente superior y tres intersecciones filtradas se considera el mejor escenario en el que el algoritmo estima la ubicación exacta.

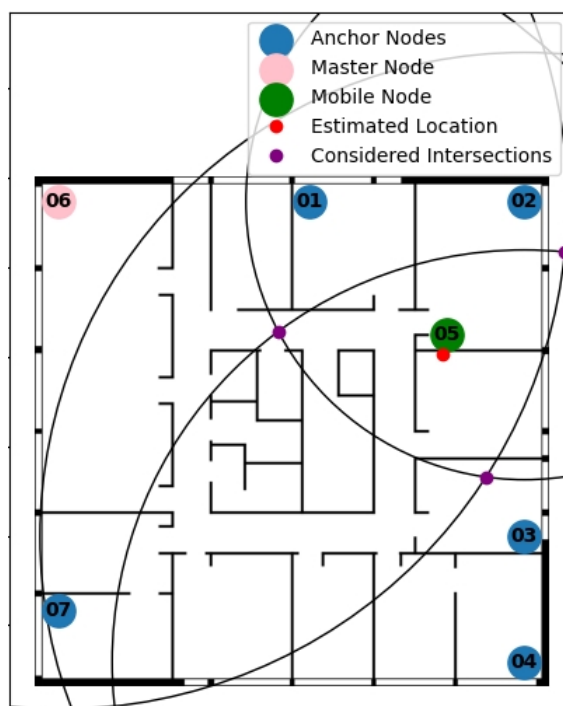


Figura 6.12: Localización, con el mejor caso con tres puntos de intersección después del filtrado.

Caso 2: Puntos de intersección

En la Figura 6.13, intentamos localizar el nodo 03. Después del rango, hay cuatro puntos de intersección filtrados a partir de los resultados del proceso de filtrado. En el caso anterior, había tres puntos de intersección filtrados que formaban una estructura similar a un triángulo y se encontró el centro de la figura geométrica como localización. Del mismo modo, en este caso también con cuatro intersecciones se considera una formación poligonal y simplemente encontrar un centroide sería la localización estimada. El algoritmo aplica la evaluación del centroide para todos los puntos de intersección filtrados independientemente de su cantidad y, por tanto, el centroide es la localización estimada del nodo 03. Observamos que, incluso con más puntos de intersección, el algoritmo sigue prometiendo una buena localización.

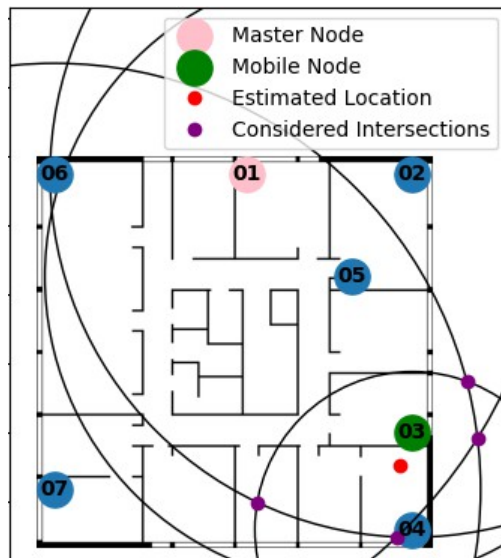


Figura 6.13: Localización con más de tres puntos de intersección después del filtrado.

Caso 3: Círculos sin intersección

La Figura 6.14, ilustra un caso extraño e interesante, donde localizamos el nodo 05. La distancia realizada entre el nodo de localización y el nodo de anclaje 03 es exactamente la misma que la distancia real. Pero para los nodos 01 y 02, la distancia es ligeramente inferior a la real. Por lo tanto, no todos los círculos formados por los valores de distancia se cruzan entre sí. Pero un círculo con el nodo 02 se cruza comúnmente con otros dos círculos, y obtenemos puntos de intersección distintos. En este caso, el algoritmo no filtra estos puntos distintos y estima una localización para el nodo 05 que es una buena estimación.

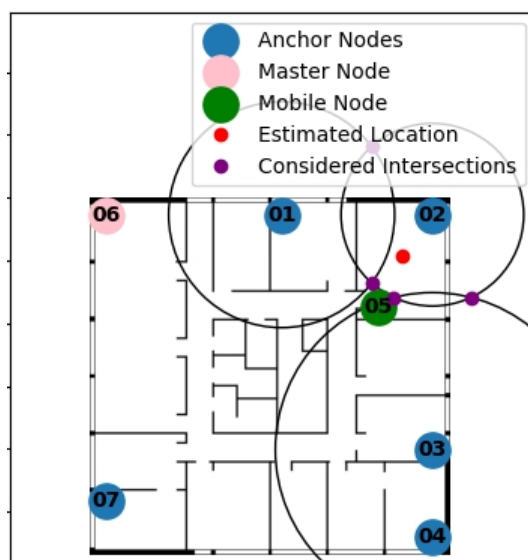


Figura 6.14: Localización cuando no todos los círculos se cruzan.

Caso 4: El escenario de los valores atípicos

En la Figura 6.15, intentamos localizar el nodo 06, y observamos que los valores de distancia son significativamente mayores que la distancia real, lo que da lugar a la posibilidad de tener intersecciones principalmente fuera del espacio. En cualquier caso, el algoritmo resistió la situación atípica y estimó una ubicación que no es lo suficientemente prometedora, pero que puede proporcionar información sobre la presencia de nodos en una sección del espacio.

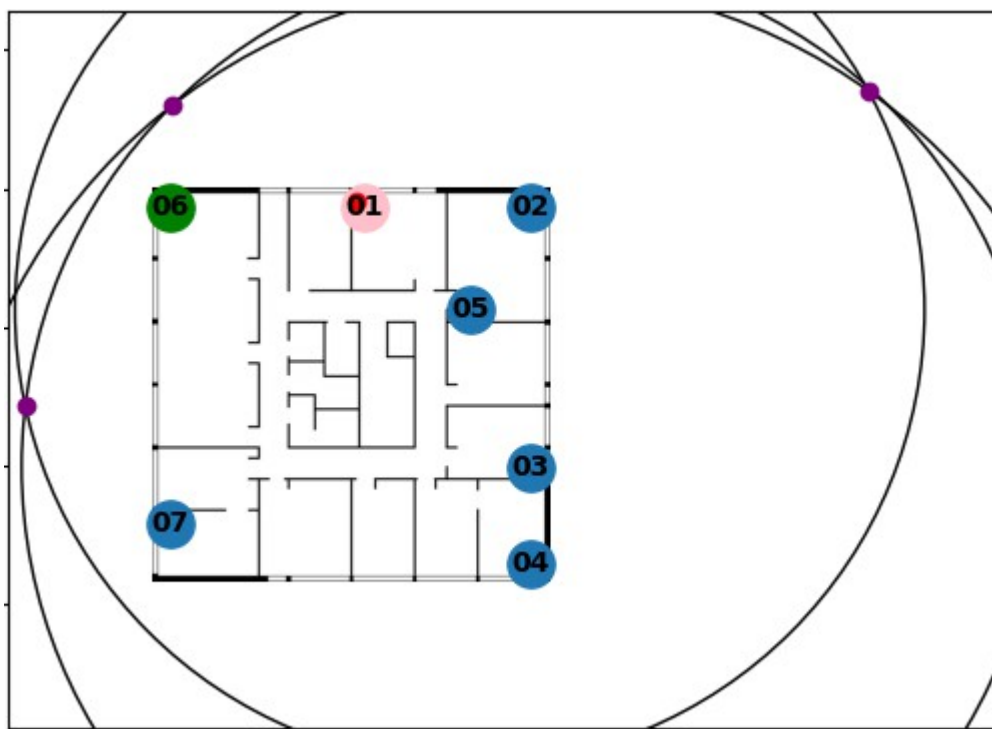


Figura 6.15: Localización con valores atípicos (Over-Ranging).

6.3.5 Conclusión de la evaluación del sistema de localización

Hemos realizado varias pruebas con nuestro sistema de localización en interiores, considerando varios casos de prueba para comprobar la eficacia del algoritmo. Como hemos mencionado anteriormente, la estimación de la localización depende exclusivamente de la calidad de la medición de distancias. Durante las pruebas, vimos que obtuvimos resultados muy precisos con datos de distancias medidas casi iguales a la verdad real sobre el terreno e incluso con los casos en los que las distancias estimadas eran ligeramente superiores a la verdad real sobre el terreno. En algunos casos, observamos resultados muy prometedores con nodos que tenían un comportamiento diferente (algunos nodos realizaban distancias inferiores a las reales) y no todos los círculos se cruzaban entre sí, es decir, no había una zona concreta de solapamiento entre los círculos. Además, el algoritmo resistió los casos atípicos en los que estimó la ubicación un poco lejos, pero proporcionó información sobre el dispositivo presente en qué sección del mapa. En múltiples muestras, también observamos que la tolerancia del algoritmo de localización para una buena estimación de la ubicación es cuando el exceso de alcance es de 5 metros o menos. E incluso en el peor de los casos, el algoritmo da una idea de la sección del espacio en la que se encuentra el dispositivo.

Capítulo 7

Conclusión

Uno de los principales objetivos de esta tesis es desarrollar un sistema de localización en interiores con LoRa 2.5GHz. Nuestra idea básica para el diseño contiene tres entidades diferentes: el maestro, el móvil y el ancla. El propósito del maestro es proporcionar información como IDs y posiciones de todas las anclas presentes en el sistema al móvil. El ancla sólo permanece en modo de alcance. A continuación, el móvil transmite la solicitud de localización e inicia secuencialmente el proceso de alcance y localización una vez que recibe la información del ancla del maestro.

En el algoritmo de nuestro sistema de localización, utilizamos una técnica de posicionamiento de multilateración, ya que las evaluaciones muestran los resultados de sobrevuelo y el hecho de que la multilateración se utiliza en tales escenarios. Además, evaluamos el algoritmo de localización en diferentes escenarios de prueba con eficiencia ajustada y no ajustada.

Observamos que el sistema puede proporcionar una estimación de localización prometedora con buenos resultados de alcance. Sin embargo, la calidad del alcance tiene un gran impacto en la estimación de la localización. En el sistema, el alcance en el peor de los casos con sobrealcance seguiría presentando la parte del espacio en la que se encuentra el dispositivo.

El otro objetivo de esta tesis es evaluar las capacidades de alcance de LoRa 2,4 GHz. Hemos observado que el parámetro LoRa afecta significativamente al rendimiento del alcance. La evaluación con 20 metros de distancia muestra que LoRa 2,4 GHz puede dar como resultado una buena estimación de la distancia con una combinación de ancho de banda de 1600 KHz con factores de propagación altos. También observamos un enorme impacto de otros factores, como los escenarios LoS y NLoS, que afectan al rendimiento del alcance incluso con combinaciones óptimas de parámetros LoRa y dan lugar a situaciones como un alcance excesivo o insuficiente. Por lo tanto, es recomendable realizar estas evaluaciones y utilizar técnicas de posicionamiento capaces de soportar estas condiciones para los sistemas de localización en interiores con LoRa 2,4 GHz.

Las evaluaciones de investigaciones anteriores rara vez se aplicarán exactamente al entorno de trabajo de nuestro sistema. Sin embargo, pueden presentar una dirección y un flujo. En consecuencia, sería beneficioso decidir las técnicas de posicionamiento para construir un sistema de localización utilizando LoRa 2,4 GHz y también para aprender más sobre el entorno de configuración de interiores y varios casos de prueba que pueden ofrecer nuevas posibilidades.

7.1 Trabajo futuro

Los resultados del sistema de localización en interiores pueden mejorarse aplicando enfoques de aprendizaje automático a las ubicaciones estimadas. Mantener un registro de las ubicaciones de salto con la creación de un historial y observar las comparaciones de comportamiento con la ubicación real, abriría posibilidades para nuevas estimaciones. Un enfoque similar al de las huellas dactilares puede ayudar a estimar la ubicación de forma más precisa con los datos de un experimento completo.

Nuestras evaluaciones se basaron en valores de distancia realizados con el motor de alcance del SX1280. El transceptor también proporciona un valor RSSI en cada operación de alcance. Combinando el RSSI obtenido y los resultados del motor de alcance se podría evaluar el alcance con LoS y NLoS con diferentes combinaciones de parámetros LoRa. Y puede probarse en nuestro sistema de localización en interiores.

Nuestro sistema de localización en interiores proporciona la ubicación estimada del dispositivo. Aparte de los dispositivos LoRa, una aplicación de interfaz de usuario que presente un mapa y ofrezca una actualización de la ubicación en tiempo real puede cumplir una función similar a la de un sistema de navegación.

Hemos diseñado el sistema de localización de dispositivos en el espacio bidimensional utilizando LoRa 2,4 GHz. Podría ser interesante diseñar y evaluar un sistema similar utilizando LoRa

2,4 GHz para un espacio tridimensional.

Acrónimos

| | |
|---|-----|
| AoA Ángulo de llegada | 4 |
| API Interfaz de programación de aplicaciones . | 6 |
| Ancho de banda BW | ix |
| BLE Bluetooth Low Energy (Bluetooth de baja energía) . | v |
| CS Selección de chip | 27 |
| DIO Entrada digital Salida | 27 |
| GPIO Entrada de propósito general Salida | 6 |
| GPS Sistema de Posicionamiento Global | iii |
| LoRaWAN Red de área amplia LoRa. | 3 |
| LoS Línea de visión | vi |
| MRC Combinación de relación máxima | 10 |
| MOSI Master-Out Slave-In | 27 |
| MISO Maestro-Entrada-Esclavo-Salida | 27 |
| Unidad de microcontrolador MCU | vi |
| NLoS Sin línea de vista | vi |
| RFID Identificación por radiofrecuencia | v |
| RSS Intensidad de la señal recibida | 4 |
| RSSI Indicador de intensidad de señal recibida | 10 |
| RTof Tiempo de vuelo de ida y vuelta | vii |
| RTOS Sistema operativo en tiempo real (Real Time Operating System) . | 6 |

| | |
|---|-----|
| SCK Reloj serie | 27 |
| SPI Interfaz de periféricos en serie . | 25 |
| Factor de dispersión SF . | vii |
| SoC System on Chip (Sistema en Chip) . | 26 |
| TDoA Diferencia horaria de llegada | 4 |
| ToA Hora de llegada | 4 |
| UWB Ultra Wide Band (banda ultraancho) . | v |
| UART Receptor Transmisor Asíncrono Universal | 20 |

Bibliografía

- [1] T. T. Khanh, V. Nguyen, X.-Q. Pham, y E.-N. Huh, *Wi-fi indoor positioning and navigation: A cloudlet-based cloud computing approach-human-centric computing and information sciences*, Jul. 2020. [En línea]. Disponible: <https://hcis-journal.springeropen.com/articles/10.1186/s13673-020-00236-8>.
- [2] Y. Cui, Y. Zhang, Y. Huang, Z. Wang y H. Fu, "Novel wifi/mems integrated indoor navigation system based on two-stage ekf", *Micromachines*, [En línea]. Disponible: <https://www.mdpi.com/2072-666X/10/3/198>.
- [3] ¿Qué es lora®? [en línea]. Disponible: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>.
- [4] X. G. Qiang Liu XiuJun Bai y S. Yang, *Lora rtt ranging characterization and indoor positioning system*, 2021. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1155/2021/5529329>.
- [5] T. L. Foundation, *Zephyr os*. [En línea]. Disponible: <https://zephyrproject.org/learn-about/>.
- [6] M. Team, *Introducción a la tecnología lora - the game changer*, Ago. 2016. [En línea]. Disponible: <https://www.digikey.de/en/maker/blogs/introduction-to-lora-technology>.
- [7] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee y J. Liu, "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 37, n° 6, pp. 1067-1080, 2007. DOI: 10.1109/TSMCC.2007.905750.
- [8] H. Obeidat, W. Shuaieb, O. Obeidat y R. Abd-Alhameed, "A review of indoor localization techniques and wireless technologies", *Wireless Personal Communications*, vol. 119, Jul. 2021. DOI: 10.1007/s11277-021-08209-5.
- [9] V. ilçi, V. Güral, R. Alkan, and H. Çizmeçi, "Trilateration technique for wifi-based indoor localization", Oct. 2015.
- [10] A. E. M. E. Ashry y B. I. Sheta, "Wi-fi based indoor localization using trilateration and fingerprinting methods", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 610, n° 1, p. 012 072, sep. 2019. DOI: 10.1088/1757-899x/610/1/012072. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/610/1/012072>.
- [11] P. Cotera, M. Velázquez, D. Cruz, L. Medina y M. Bandala, "Indoor robot positioning using an enhanced trilateration algorithm", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 13, no. 3, p. 110, 2016. DOI: 10.5772/63246. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.5772/63246>.

- [12] *Radio frequency ranging for precise indoor localization*. [En línea]. Disponible: https://edoc.hu-berlin.de/bitstream/handle/18452/19525/dissertation__sark_vladica.pdf?sequence=3.
- [13] S. Pande and K. S. Ibwe, *Robust trilateration based algorithm for indoor positioning systems*. [En línea]. Disponible: <https://www.ajol.info/index.php/tjs/article/view/212601>.
- [14] B. Cook, G. Buckberry, I. Scowcroft, J. Mitchell y T. Allen, "Indoor location using trilateration characteristics", enero de 2005.
- [15] *Sx1280*. [en línea]. Disponible: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-24ghz/sx1280>.
- [16] Z. Zhang, S. Cao, y Y. Wang, "A long-range 2.4g network system and scheduling scheme for aquatic environmental monitoring", *Electronics*, vol. 8, p. 909, ago. 2019. DOI: 10.3390/electronics8080909.
- [17] *Modelo de controlador de dispositivo*. [En línea.] Disponible: <https://docs.zephyrproject.org/latest/kernel/drivers/index.html>.
- [18] *Proyecto Zephyr: semiconductores nórdicos*. [En línea]. Disponible: https://developer.nordicsemi.com/nRF_Connect_SDK/doc/2.0.0/zephyr/introduction/index.html.
- [19] Semtech, *An introduction to ranging with the sx1280 transceiver*. [En línea]. Disponible: https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/44000000MDiH/OF02Lve2RzM6pUw9gNgSJXbDNaQJ_NtQ555rLzY3UvY.
- [20] *Hoja de datos de Semtech sx1280*. [En línea]. Disponible: https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R000000HoCW/8EVYKPLcthcKCB_cKzApAc6Xf6tAHtn9.UKcOh7SNmg.
- [21] A. Alarifi, A. Al-Salman, M. Alsaleh y otros, "Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances", *Sensors*, vol. 16, pp. 1-36, mayo de 2016. DOI: 10.3390/s16050707.
- [22] M. S. Svalastog, *Indoor positioning-technologies, services and architectures*, junio de 2007. [En línea]. Disponible: <http://urn.nb.no/URN:NBN:no-15083>.
- [23] M. Segura, V. Mut y C. Sisterna, "Ultra wideband indoor navigation system", *Radar, Sonar Navigation, IET*, vol. 6, pp. 402-411, jun. 2012. DOI: 10.1049/iet-rsn.2011.0352.
- [24] A. Kalbandhe y S. Patil, "Indoor positioning system using bluetooth low energy", dic. 2016, pp. 451-455. DOI: 10.1109/CAST.2016.7915011.
- [25] V. Paterna, A. Calveras, J. Aspas y M. Bullones, "A bluetooth low energy indoor positioning system with channel diversity, weighted trilateration and kalman filtering", *Sensors*, vol. 17, p. 2927, dic. 2017. DOI: 10.3390/s17122927.
- [26] S. Robinson, *¿Qué es lora?* [en línea]. Disponible: <https://stuartprojects.github.io/WhatIsLoRa.html>.

-
- [27] R. Stuart, *Semtech sx1280 2.4ghz lora® ranging transceivers*. [en línea]. Available: <https://stuartprojects.github.io/2019/04/26/Semtech-SX1280-2-4Ghz-LoRa-ranging-transceivers.html>.
- [28] F. Rander Andersen, K. Dilip Ballal, M. Nordal Petersen y S. Ruepp, "Ranging capabilities of lora 2.4 ghz", en *2020 IEEE 6th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 2020, pp. 1-5. DOI: 10.1109/WF-IoT48130.2020.9221049.
- [29] *Círculos y esferas*. [en línea]. Disponible: <http://paulbourke.net/geometry/circlesphere/>.
- [30] SX1280, *Dlp-rfs1280 módulo transceptor lora rf-dlp design | mouser*. [En línea]. Disponible: <https://www.mouser.de/new/dlp-design/dlp-design-rfs1280-rf-module/>.
- [31] N. Semiconductores, *Nrf52840 dk*. [En línea]. Disponible: <https://www.nordicsemi.com/Products/Development-hardware/nrf52840-dk>.
- [32] Zephyr, *Devicetree howtos*, febrero de 2022. (en línea). Disponible: <https://docs.zephyrproject.org/3.0.0/guides/dts/howtos.html>.
- [33] L. Hass, *Lora de 2,4 ghz en edificios inteligentes: Desarrollo de controladores para zephyr os y comparación con ble*. [en línea]. Disponible: https://www.ds.informatik.uni-kiel.de/en/teaching/bachelor-and-master-theses/completed-master-and-bachelor-theses/2021_bachelor-thesis_Lukas-Hass.pdf.

Apéndice A

Parcelas de evaluación adicionales

A.1 Sistema de evaluación de alcance

A.1.1 LoS

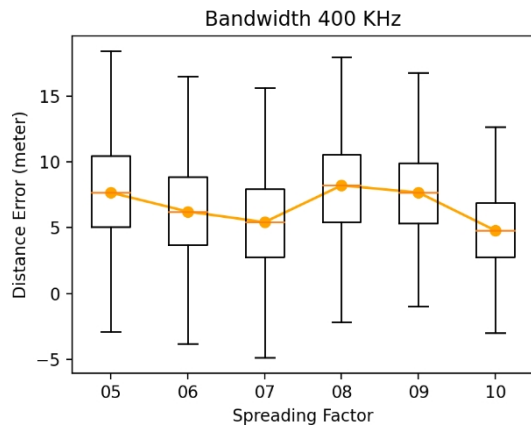


Figura A.1: SFs con BW 400KHz.

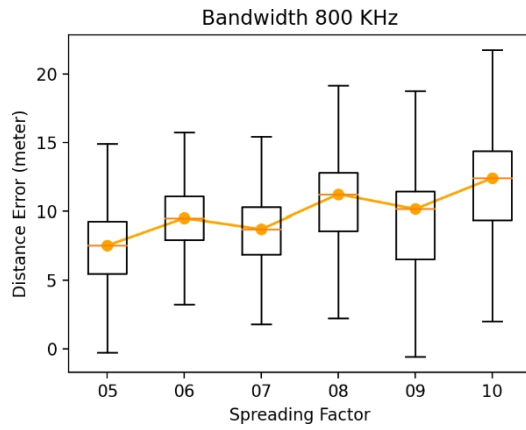


Figura A.2: SFs con BW 800KHz.

A.1.2 NLoS

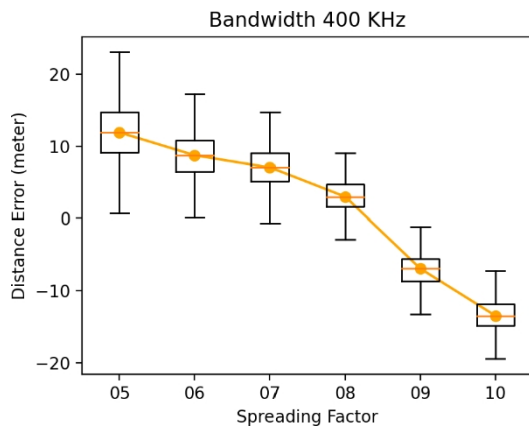


Figura A.3: SFs con BW 400KHz.

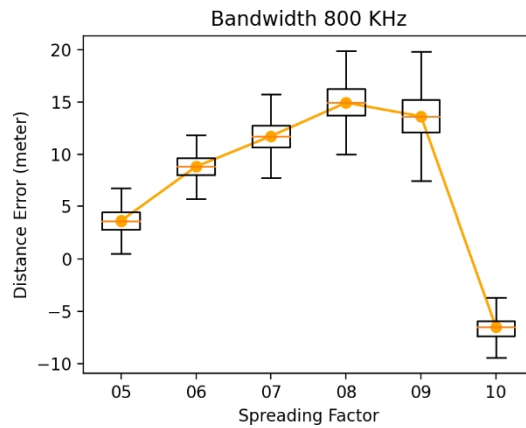


Figura A.4: SFs con BW 800KHz.

A.2 Sistema de localización en interiores

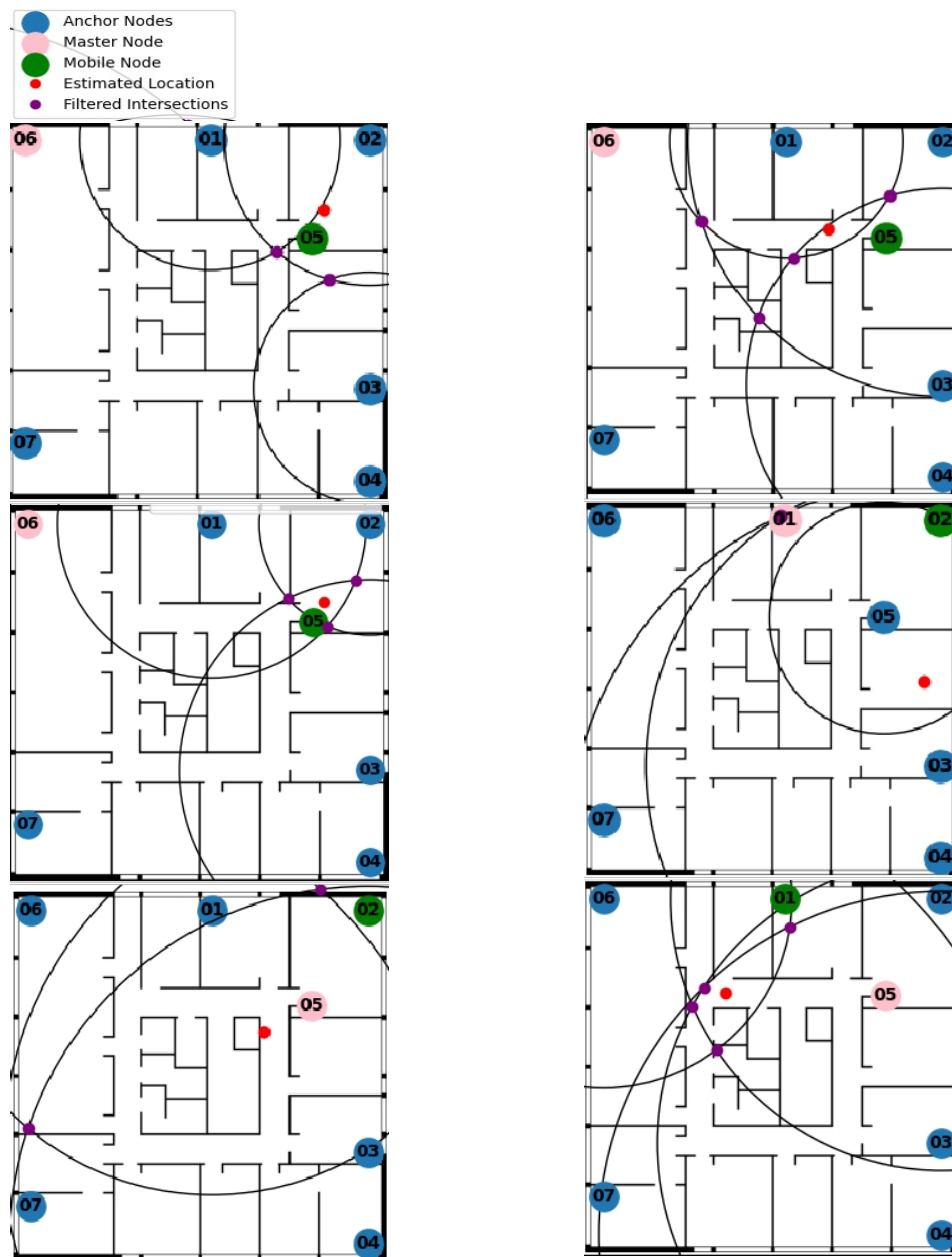


Figura A.5: Varios casos con distinta posición del nodo móvil.