



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Informática de Sistemas y Computadores

Localización y tracking de dispositivos móviles usando
tecnología LoRaWAN

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Computadores y Redes

AUTOR/A: Casillas Ramos, Martin

Tutor/a: Manzoni, Pietro

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Máster en Ingeniería de Computadores y Redes
Trabajo Fin de Máster

Localización y tracking de dispositivos móviles usando tecnología LoRaWAN

Autor: *Martín Casillas Ramos*

Director: *Pietro Manzoni*

Julio, 2024



AGRADECIMIENTOS

En este viaje académico que culmina hoy, quiero agradecer a mis padres por su presencia y dedicación, por sus enseñanzas que han sido guía para cada paso que he dado. Gracias por ser mi inspiración y meta, por las incontables horas de apoyo, paciencia y amor incondicional. Este logro es también es de ustedes, reflejo del esfuerzo trabajo que han puesto en mí.

Amigos, compañeros de aventuras y desventuras, gracias por estar siempre ahí, por las palabras de aliento en los momentos de duda y por celebrar cada pequeña victoria como si de un logro increíble se tratara. Este viaje no hubiera sido lo mismo sin su amistad y apoyo.

Y finalmente, a Ana, porque su presencia en mi vida ha sido el regalo más precioso que he recibido. Has sido mi refugio y mi mayor fuente de alegría, gracias por el tiempo, por cada palabra de aliento y, sobre todo, por tu amor y paciencia que no tienen límite. Gracias por formar parte de mí y de mi vida.

Con todo mi cariño y gratitud, Martín.

RESUMEN

El presente documento se centra en el desarrollo de un sistema avanzado para la localización y seguimiento de dispositivos móviles utilizando la tecnología LoRaWAN. El documento explora en profundidad las capacidades de esta tecnología, especialmente en términos de eficiencia energética y alcance de la comunicación, proponiéndola como una alternativa más en el campo de las soluciones de localización.

Se proporciona una revisión del marco teórico que sustenta de manera conceptual el sistema, describiendo las características distintivas de la tecnología LoRa y LoRaWAN y su adecuación para aplicaciones IoT que hacen uso de las comunicaciones inalámbricas pero que tienen restricciones de consumo eléctrico. Adicionalmente, se hace una comparación de distintas tecnologías inalámbricas como WiFi, Bluetooth LE, UWB, RFID, etc.

En las secciones de diseño e implementación se detalla de manera teórica los conceptos claves que constituyen las bases del sistema y la manera en que estos interactúan para ofrecer los resultados deseados.

Finalmente, se muestran los resultados obtenidos de las pruebas y mediciones realizadas, se contrastan con lo que era esperado desde el análisis y diseño, y se interpretan con la intención de dar una explicación sobre los motivos de dichas observaciones. En particular, se demuestra que el uso de LoRaWAN para localización en interiores tiene un gran potencial y que es posible mejorar sus prestaciones realizando implementaciones más robustas.

Palabras Clave: LoRaWAN, Localization, Tracking, IoT, RSS, Real-time, Mapping



ABSTRACT

This document focuses on the development of an advanced system for the localization and tracking of mobile devices using LoRaWAN technology. The document thoroughly explores the capabilities of this technology, especially in terms of energy efficiency and communication range, proposing it as an additional alternative in the field of localization solutions.

A review of the theoretical framework that conceptually underpins the system is provided, describing the distinctive characteristics of LoRa and LoRaWAN technology and their suitability for IoT applications that use wireless communications but have electrical consumption restrictions. Additionally, a comparison is made of various wireless technologies such as WiFi, Bluetooth LE, UWB, RFID, etc.

In the design and implementation sections, the key concepts that form the basis of the system are detailed theoretically, and the way in which these interact to deliver the desired results is described.

Finally, the results obtained from tests and measurements are shown, contrasted with what was expected from the analysis and design, and interpreted with the intention of providing an explanation for the reasons behind these observations. It is demonstrated that the use of LoRaWAN for indoor localization has great potential and that its performance can be improved by implementing more robust solutions.



INDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT.....	iv
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Objetivos específicos	1
1.4 Impacto esperado.....	2
1.5 Estructura.....	2
2 MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Tecnología LoRa.....	5
2.2 Tecnología LoRaWAN.....	6
2.3 Otras tecnologías.....	6
2.3.1 WiFi.....	7
2.3.2 Bluetooth Low Energy	7
2.3.3 Ultra-Wideband.....	7
2.3.4 RFID.....	7
2.3.5 Ventajas y Desventajas.....	8
2.4 Técnicas RSS.....	8
2.4.1 Técnicas basadas en distancia	8
2.4.2 Técnicas basadas en perfilamiento de RSS.....	9
2.5 Técnicas alternativas.....	11
2.5.1 ToA.....	11
2.5.2 TDoA	12
2.5.3 AoA	12
2.6 Localización en interiores	13
2.7 Técnicas de filtrado.....	14
2.7.1 Filtro Gaussiano	14
2.7.2 Filtro de Kalman.....	15
2.8 Lateración	16



2.8.1	Conceptos básicos	16
2.8.2	Restricciones.....	17
2.8.3	Implementación.....	18
3	ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN	19
3.1	Requerimientos y retos principales	19
3.2	Análisis del diseño conceptual.....	20
3.3	Evaluación y pruebas necesarias	20
3.4	Diseño de la solución	21
3.4.1	Dispositivo final	21
3.4.2	Procesado y herramientas.....	25
4	IMPLEMENTACIÓN	36
4.1	Dispositivo final.....	36
4.2	Procesado y herramientas	38
4.2.1	Creación del mapa.....	38
4.2.2	Toma de mediciones de prueba	40
4.2.3	Cálculo de mejor RSS_NULL.....	40
4.2.4	Ejecución de benchmark	40
4.2.5	Ejecución de servidor web.....	41
4.2.6	Proceso de localización.....	41
4.3	Entorno	41
5	RESULTADOS	43
6	CONCLUSIONES	51
6.1	Trabajo futuro	51
7	BIBLIOGRAFIA	53
8	ANEXOS	54
8.1	Código del dispositivo final	54
8.2	Código de ficheros de procesado y herramientas	54
9	GLOSARIO	56



INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. MODELO DE CAPAS DE LORA Y LORAWAN [1]	5
FIGURA 2. MEDICIONES PARA PERFILAMIENTO RSS	10
FIGURA 3. LORA TIME SYNCHRONIZATION PROTOCOL (LTSP) [5]	11
FIGURA 4. TÉCNICA TDOA [6]	12
FIGURA 5. TÉCNICA AOA [7]	12
FIGURA 6. EFECTO DEL FILTRO GAUSSIANO EN LA REDUCCIÓN DE RUIDO	14
FIGURA 7. LOCALIZACIÓN MEDIANTE TRILATERACIÓN	17
FIGURA 8. RECEPCIÓN DE MENSAJE POR GATEWAYS LORAWAN EN INTERIORES	22
FIGURA 9. DIAGRAMA DE FLUJO DEL FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO FINAL	23
FIGURA 10. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE LOCALIZACIÓN	27
FIGURA 11. EJEMPLO DE TRANSMISIÓN DE MENSAJES MEDIANTE LORA	29
FIGURA 12. EJEMPLO DE PÉRDIDA DE MENSAJES EN RED LORA	31
FIGURA 13. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE SIMULACIÓN	34
FIGURA 14. LILYGO T-IMPULSE	36
FIGURA 15. TOMA DE MEDICIONES CON DISPOSITIVO FINAL EN EXTERIOR	39
FIGURA 16. DIVISIÓN POR ZONAS DEL EDIFICIO 1G	42
FIGURA 17. RESULTADO DE EJECUCIÓN DEL BENCHMARK MÚLTIPLES VECES	43
FIGURA 18. VOLTAJE DE LA BATERÍA EN EL TIEMPO	44
FIGURA 19. COMPARATIVA DE VOLTAJE DE LA BATERÍA CON Y SIN GPS	44
FIGURA 20. MARCADOR EN MAPA EN UBICACIÓN EXTERIOR	45
FIGURA 21. MARCADOR EN MAPA EN UBICACIÓN INTERIOR	45
FIGURA 22. PRECISIÓN DEL SISTEMA POR ZONAS Y POR CANTIDAD DE MENSAJES CONSIDERADOS (PRECISIÓN TOTAL)	46
FIGURA 23. PRECISIÓN PROMEDIO DEL SISTEMA	47
FIGURA 24. PRECISIÓN DEL SISTEMA POR ZONAS Y POR CANTIDAD DE MENSAJES CONSIDERADOS (PRECISIÓN DE ZONA)	48
FIGURA 25. COMPARATIVA DE PRECISIÓN TOTAL Y DE ZONA DEL SISTEMA	48
FIGURA 26. COMPARATIVA DE ALGORITMOS EN DISTINTAS UBICACIONES. ARRIBA 0C, ABAJO 0E	49
FIGURA 27. PRECISIÓN DEL SISTEMA CON DISTINTOS VALORES DE RSS_NULL	50

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. COMPARATIVA DE TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS	8
TABLA 2. EJEMPLO DE INFORMACIÓN DEL DATO DE MEDICIONES RSS	30
TABLA 3. EJEMPLO DE DATO DE MEDICIONES RSS CON PÉRDIDA DE MENSAJES	31
TABLA 4. EJEMPLO DE DATO DE MEDICIONES RSS CONSIDERANDO HISTORIAL	32

1 INTRODUCCIÓN

En un mundo cada vez más conectado, la capacidad para localizar y dar seguimiento a dispositivos que se encuentran en movimiento con precisión se ha convertido en un reto y una necesidad, esto en diferentes ámbitos como la logística, la gestión de activos, la seguridad y el bienestar personal.

La tecnología LoRa en conjunto con LoRaWAN, conocida particularmente por su alta eficiencia energética y amplio alcance en comunicaciones inalámbricas, surge como una posible solución a los desafíos asociados a la localización eficiente de dispositivos.

Este trabajo se centra en el análisis, diseño y desarrollo de un sistema de localización que usa como pieza fundamental la tecnología LoRaWAN, proponiendo una serie de herramientas y técnicas para poder aplicar esta tecnología y formar una solución viable al reto de la localización de dispositivos móviles.

1.1 Motivación

La posibilidad de localizar personas u objetos es algo muy relevante en situaciones y contextos muy diversos, hay escenarios en los que se podría considerar como una necesidad crítica en la que, de no tener los datos de localización, se podrían poner en riesgo la vida de las personas. Lo anterior, junto con el desarrollo de la tecnología es la principal motivación para la realización de este trabajo, porque no hay mejor incentivo que aumentar en la calidad de vida de la sociedad mediante la innovación tecnológica.

Adicionalmente, la evaluación de distintas herramientas en búsqueda de una solución óptima es algo fundamental cuando se persigue un objetivo concreto, es por ello por lo que espero que este trabajo sea un aporte más y permita en un futuro cercano cumplir con la meta de acercar la localización eficiente al mundo.

1.2 Objetivos

El objetivo general es desarrollar un sistema de localización avanzado y eficiente, especializado en la monitorización de personas u objetos que requieran ser ubicados con facilidad y de forma precisa cuando sea requerido. Este sistema buscará tener características técnicas que permitan incorporarse de manera sencilla a la vida de las personas, priorizando su portabilidad y eficiencia.

1.3 Objetivos específicos

- ▶ Diseñar un sistema de localización que pueda funcionar tanto en interiores como en exteriores.
- ▶ Hacer uso de dispositivos que sean ligeros y compactos, facilitando su integración a elementos cotidianos.
- ▶ Implementar estrategias de eficiencia energética en el dispositivo, con el fin del lograr un funcionamiento prolongado.

- ▶ Lograr una precisión funcional, útil y confiable.
- ▶ Utilizar la tecnología LoRaWAN en el sistema y aprovechar su capacidad de comunicación a larga distancia.

1.4 Impacto esperado

Este trabajo de fin de máster pretende generar conocimiento sobre la viabilidad de la tecnología de comunicación LoRaWAN como una alternativa factible a otros mecanismos de comunicación inalámbricos enfocados en la cobertura amplia con alta eficiencia energética. Así mismo, se busca que sea un punto de partida para futuros desarrollos de dispositivos más especializados y que, tomando en consideración los hallazgos encontrados, tengan características superiores a las de los dispositivos que se tuvo acceso durante este trabajo y a los del mercado en general.

1.5 Estructura

El desarrollo de este trabajo de fin de máster será dividido en los capítulos que son detallados a continuación:

- ▶ Capítulo 2 – Marco teórico
- ▶ Capítulo 3 – Análisis y diseño de la solución
- ▶ Capítulo 4 – Implementación
- ▶ Capítulo 5 – Resultados
- ▶ Capítulo 6 – Conclusiones.

2 MARCO TEÓRICO

El propósito de este capítulo es servir como referencia del estado actual de la tecnología, técnicas utilizadas y demás avances en lo relacionado a la localización y rastreo de dispositivos usando LoRaWAN en conjunto con GPS, además de tópicos relevantes para el desarrollo de este trabajo.

2.1 Tecnología LoRa

En el mundo de las comunicaciones inalámbricas de área amplia y bajo consumo y en particular en el mundo del IoT, se suelen mencionar los términos LoRa y LoRaWAN, y en ocasiones estos se utilizan sin distinción, lo que es un error. Realmente representan conceptos distintos pero que son complementarios en este tipo de redes, por un lado, LoRa es la capa física y por otro, LoRaWAN es la capa de acceso al medio.

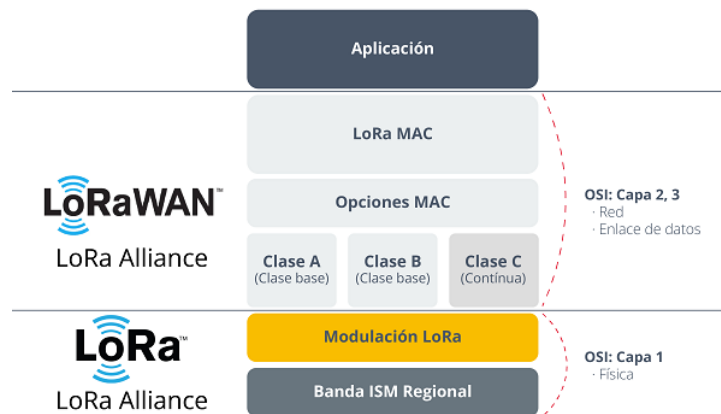


Figura 1. Modelo de capas de LoRa y LoRaWAN [1]

Por un lado, se encuentra LoRa, que es una tecnología de modulación de espectro ensanchado basada en la modulación Chirp Spread Spectrum [2]. Es importante destacar que LoRa opera y hace uso de las bandas de transmisión ISM, mismas que pueden ser usadas sin necesidad de alguna licencia o permiso en particular.

Algunas de sus características más destacadas son:

► **Largo alcance:**

Dependiendo de las condiciones ambientales y del entorno se pueden llegar a lograr transmisiones a larga distancia, una decena de kilómetros. En condiciones menos ideales como en entornos urbanos, con alta densidad de edificaciones este alcance puede verse reducido drásticamente.

► **Bajo consumo:**

Por sus características y mecanismos de transmisión su consumo energético es bajo, lo que fomenta su uso en dispositivos con capacidad eléctrica limitada.

► Funcionalidad en ambientes ruidosos:

Gracias a su tecnología de modulación CSS, LoRa puede funcionar efectivamente en entornos con una gran cantidad de interferencia.

2.2 Tecnología LoRaWAN

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) es un protocolo de comunicación inalámbrico caracterizado por ser de bajo consumo eléctrico y estar diseñado para transmisiones a larga distancia. Debido a estas características y a que es ideal para transmitir pocas cantidades de información, LoRaWAN ha encontrado casos de uso principalmente en dispositivos IoT.

En términos generales se podría considerar que LoRaWAN es el resultado de buscar hacer uso de LoRa, como capa física, para una red de área amplia de bajo consumo [1].

Esta tecnología opera en las bandas de frecuencia sub-GHz, 868 MHz en Europa, permitiendo lograra una cobertura de señal amplia manteniendo una relación de distancia-potencia muy favorable, lo que la convierte en una solución de comunicación inalámbrica a considerar cuando los dispositivos tienen limitaciones respecto al consumo energético.

LoRaWAN es utilizada tanto en espacios interiores como exteriores, particularmente hablando de su uso para aplicaciones de localización puede proveer más funcionalidades que solo como red de comunicación.

En el caso de la localización en exteriores, su uso puede ser combinado con GPS para lograr obtener información de ubicación precisa. El receptor GPS del dispositivo móvil se encarga de recibir señales de distintos satélites para luego procesarla y poder determinar sus coordenadas geográficas además de información adicional relevante. Este mecanismo puede ser utilizado para realizar seguimiento de objetos, vehículos e inclusive personas.

La localización en ambientes interiores se enfrenta a un reto particular ya que las señales GPS suelen no estar disponibles debido a la falta de recepción o su baja potencia e inestabilidad ocasionan errores y problemas con la precisión de la ubicación. Una posible respuesta a este problema es estimar la posición del dispositivo mediante las medidas de potencia de los mensajes recibidos en los gateway LoRaWAN.

El valor RSS (Received Signal Strength) representa la potencia de la señal recibida, y puede ser utilizado para aproximar la distancia que se tiene entre el dispositivo y el gateway, además, si el mismo mensaje es recibido en distintos puntos de acceso, se tendrán múltiples valores de RSS y mediante el conjunto de ellos se puede calcular de mejor manera la ubicación del origen del mensaje con una precisión razonable.

2.3 Otras tecnologías

En el campo de la localización y rastreo de dispositivos, distintas tecnologías han sido exploradas y utilizadas para intentar determinar con precisión la ubicación de objetos o personas, tanto en ambientes interiores como exteriores. Aunque el presente trabajo se

centra en el uso de LoRaWAN, es esencial revisar y comparar otras tecnologías equiparables para poder entender sus ventajas y limitaciones cuando tienen un uso similar.

2.3.1 WiFi

El WiFi es una tecnología ampliamente utilizada y establecida debido a su amplia disponibilidad en dispositivos comerciales actuales, y es una de las principales tecnologías en lo referente a la transmisión de datos de alta velocidad. Sin embargo, en lo referente a la localización, ha mostrado lograr una precisión razonable tanto con técnicas RSS como de perfilamiento.

Un factor importante para considerar con esta tecnología es que la congestión y la interferencia debido a su uso tan extendido podría generar grandes obstáculos e interferencias para lograr una localización confiable.

2.3.2 Bluetooth Low Energy

El Bluetooth BLE es conocido por su notable eficiencia energética y es frecuentemente utilizado en aplicaciones de localización en interiores mediante lo que se conoce como beacons, que en términos generales actúan como nodos de referencia que tienen una ubicación conocida. A pesar de ser una tecnología muy destacable debido a su bajo consumo energético, su alcance es limitado, lo que restringe su uso únicamente para ambientes interiores.

2.3.3 Ultra-Wideband

UWB, por sus siglas en inglés, es una tecnología reconocida por ofrecer una alta precisión en la localización de dispositivos debido a que sus características de radiofrecuencia le brindan la capacidad de atravesar distintos tipos de obstáculos y una cierta inmunidad a las interferencias. Aunque se perfila como una tecnología prometedora, el costo de los dispositivos y de la infraestructura asociada aún es muy elevado en comparación a otras tecnologías.

2.3.4 RFID

Aunque en principio esta tecnología está centrada principalmente en la transferencia a corta distancia de pequeñas cantidades de información, también podría ser utilizada para la localización de dispositivos. Los sistemas RFID activos de alguna manera mejoran o eliminan la limitación del alcance, pero esto a su vez va en contra de su principal característica que es la simplicidad y bajo coste.

2.3.5 Ventajas y Desventajas

Tabla 1. Comparativa de tecnologías inalámbricas

Tecnología	Ventajas	Desventajas
WiFi	Alta disponibilidad, precisión alta, rango razonable	Susceptible a interferencias, alto consumo.
BLE	Rango limitado, muy bajo consumo	Precisión variable, alcance limitado
UWB	Muy alta precisión, inmune a interferencias	Coste elevado, rango muy limitado.
RFID	Bajo consumo	Alcance variable, precisión baja.
LoRa	Muy amplio alcance, bajo consumo	Atenuación elevada debido a obstáculos.

2.4 Técnicas RSS

En distintas investigaciones se han propuesto diversas técnicas para poder modelar y calcular distancias a partir del valor RSS con el fin de posteriormente utilizar estos valores para obtener una localización. Tal como se menciona en [3] estas técnicas pueden dividirse en dos grupos, por un lado, las que buscan crear un modelo que permita llevar los valores de potencia a un valor de distancia, y por otro lado las que buscan realizar comparaciones con puntos previamente medidos para estimar si el origen de la señal se encuentra cerca de un punto o de otro.

2.4.1 Técnicas basadas en distancia

Se basan en la medición de la intensidad de la señal recibida en cada mensaje para poder estimar la distancia entre dos puntos, el del dispositivo transmisor y el del receptor. La relación entre el nivel de intensidad de la señal recibida y la distancia puede modelarse mediante una función [3] como la siguiente:

$$P_r(d)[dBm] = P_0(d_0)[dBm] - 10n_p \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma$$

Dicha función toma como parámetros elementos como la potencia recibida a una distancia de referencia, el factor de pérdida de potencia respecto a la distancia y otros parámetros ambientales. Todos estos valores tienen que ser obtenidos mediante mediciones previas, una vez que se tienen ya puede usarse la ecuación para transformar el RSS en una distancia física.

2.4.1.1 Ventajas

Este tipo de técnicas presentan algunos beneficios y características muy útiles en soluciones de localización, como pueden ser:

- Bajo costo:

Debido a que la mayoría de los sensores y nodos inalámbricos de la actualidad tienen la capacidad de medir u obtener el valor RSS la capacidad de aplicar esta técnica es casi segura y no requiere de hardware adicional.

► Flexibilidad en la implementación:

Las técnicas basadas en distancia son flexibles respecto a que pueden ser implementadas en una variedad de entornos, tanto en interior como en exterior, espacios reducidos o largas distancias. Adicionalmente, pueden funcionar en espacios en los que previamente no se había estado o contemplado originalmente si las condiciones de red lo permiten.

2.4.1.2 Desventajas

Existen una serie de retos cuando se intenta trabajar con este tipo de técnicas, en su mayoría relacionados a la aplicación de las fórmulas en las que se basa:

► Susceptibilidad a interferencias:

La señal puede verse afectada por obstáculos físicos, otras señales y además algunos elementos ambientales como la temperatura y humedad. Estos cambios provocan una variabilidad en el valor calculado de potencia recibida y por tanto llevar a estimaciones de distancia inexactas.

► Calibración:

Para obtener estimaciones de distancia precisas se requiere modelar correctamente el ambiente del despliegue para que sus características puedan ser correctamente representadas en los parámetros de las ecuaciones, esto puede ser un proceso complicado y laborioso.

2.4.2 Técnicas basadas en perfilamiento de RSS

También mencionadas como técnicas de fingerprinting, estas técnicas en lugar de convertir RSSI en distancia, utilizan un mapa de intensidades de señal previamente construido a base de mediciones en diferentes puntos de un área cubierta. Durante la fase en la que se busca ubicar el dispositivo, se compara la intensidad de señal recibida con este mapa de señales para estimar la ubicación del dispositivo.

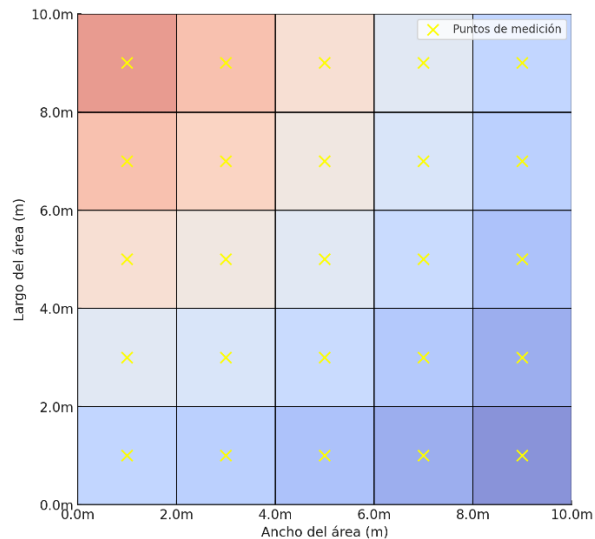


Figura 2. Mediciones para perfilamiento RSS

2.4.2.1 Ventajas

Este enfoque es particularmente útil en ambientes interiores complejos o cambiantes, donde los múltiples obstáculos, reflejos y difracciones de la señal pueden hacer que los modelos basados en distancia sean menos precisos o altamente complejos.

► **Precisión superior en interiores:**

Debido a que en los entornos interiores se encuentran gran variedad de obstáculos la propagación de la señal no se puede dar de manera uniforme en todas las direcciones, sin embargo, esto no genera inconvenientes con estas técnicas debido a que la medición inicial se da en cada una de esas condiciones particulares, sin necesidad de obtener alguna medición o valor generalizado.

► **Adaptabilidad a cambios ambientales:**

Aunque esta técnica requiere volver a realizar el mapeo ante cambios significativos del entorno, puede adaptarse correctamente a cambios menores debido a la naturaleza de la técnica, al no requerir que los valores medidos coincidan exactamente con las mediciones originales, los cambios menores pueden ser enmascarados.

2.4.2.2 Desventajas

Sin embargo, a pesar de ser efectivas en distintos escenarios, presentan algunas consideraciones y desventajas que pueden limitar su aplicación o eficiencia:

► **Mapeo inicial:**

El proceso de mapeo inicial, que también podría llamarse de calibración, requiere una extensa recolección de datos en la fase inicial para crear un mapa detallado de la intensidad de la señal en diferentes puntos de la zona que resulta de interés. Este proceso puede llegar a ser laborioso según la cantidad de puntos que se requieran y debe repetirse si hay cambios significativos en el entorno.

► Variaciones del entorno:

Como se mencionaba en el punto anterior, las mediciones pueden verse afectadas por factores como nuevas construcciones, remodelaciones, cambios en los muebles, inclusive la cantidad de personas presentes. Estos factores y condiciones no controladas pueden llegar a alterar significativamente la intensidad de la señal, haciendo que las muestras ya no correspondan con la realidad del momento, provocando en última instancia la estimación incorrecta de la posición de los dispositivos.

2.5 Técnicas alternativas

Existen también técnicas que no se basan directamente en la potencia de la señal recibida, sino en otro conjunto de características que de igual forma permiten obtener información sobre la posición del emisor. Estas técnicas pudieran usarse tanto de manera complementaria a las RSS como de manera única en escenarios en los que las técnicas de potencia de señal no son ideales.

2.5.1 ToA

Probablemente una de las técnicas más intuitivas y evidentes es hacer uso del tiempo que tarda un mensaje en llegar del nodo transmisor al receptor (Time of Arrival) para estimar la distancia entre ambos puntos. Tal como se comenta en [4] en teoría esto debería ser sencillo, sin embargo, la complejidad de esta técnica recae principalmente en que la sincronización entre los dispositivos es clave.

Lo anterior puede verse evidenciado al considerar que la velocidad de propagación de las señales RF van a la velocidad de la luz, aproximadamente 300000 Km/s, por lo que una diferencia en la medición de tan solo un nanosegundo representa un fallo en el cálculo de la distancia de aproximadamente 30 cm.

Debido a lo mencionado, para lograr resultados acertados se requiere de un método como LTSP, propuesto en [5], que tenga en consideración los relojes de ambos nodos y su posible desfase temporal.

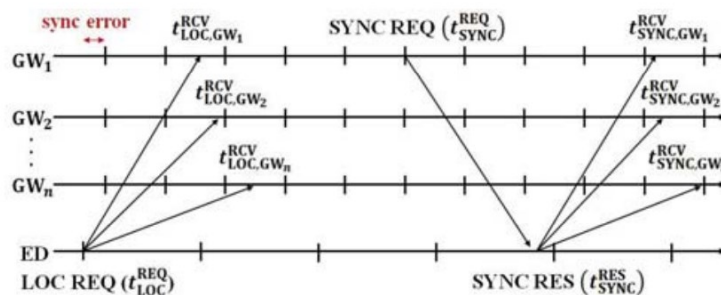


Figura 3. LoRa Time Synchronization Protocol (LTSP) [5]

2.5.2 TDoA

A diferencia de ToA, el posicionamiento por Time Difference of Arrival se fundamenta en utilizar la diferencia temporal de llegada de la señal a cada nodo receptor, sin necesidad de utilizar el tiempo de inicio de la transmisión. Lo anterior, tiene como consecuencia que las características de hardware del nodo transmisor sean más permisivas [6], fomentando así su simplicidad de diseño y su bajo consumo energético.

En términos generales, utilizando las diferencias temporales y conociendo la posición de los nodos receptores se pueden construir un conjunto de hipérbolas donde el punto de intersección representa la posición del nodo transmisor. Es importante mencionar que debido a que, por las características de las hipérbolas, se obtendrán dos puntos estimados, se pueden usar técnicas sencillas de RSS para elegir el punto correcto.

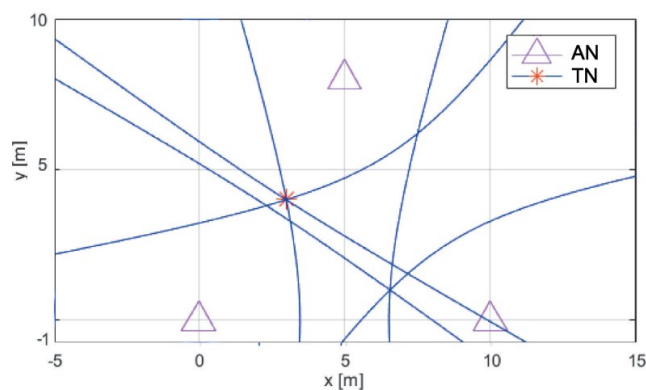


Figura 4. Técnica TDoA [6]

2.5.3 AoA

La técnica Angle of Arrival se basa en que el dispositivo receptor está compuesto de un arreglo de antenas y que como se menciona en [7] mediante la medición de la diferencia de tiempo de llegada a cada elemento del arreglo de antenas se puede estimar el ángulo con el que venía la señal de origen.

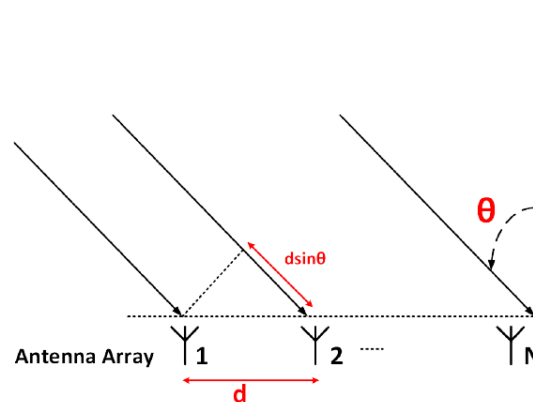


Figura 5. Técnica AoA [7]

Uno de sus principales inconvenientes es que pequeñas variaciones o errores en los cálculos pueden resultar en ubicaciones muy imprecisas, por lo que la calibración y

calidad del hardware resulta muy importante, aún más en entornos en los que se puedan dar condiciones de recepción de la señal por múltiples caminos (signal multipath).

2.6 Localización en interiores

El proceso de localización en interiores utilizando LoRaWAN puede ser estructurado en varias etapas generales, que buscan optimizar la precisión y eficiencia del sistema cuando se está haciendo uso de este. A continuación, se muestra un procedimiento basado en el descrito en [8], pero modificado de tal manera que sea más general y no enfocado directamente en las técnicas RSS basadas en distancia.

► Pre-localización

Esta etapa inicial se centra en reunir conocimiento sobre el ambiente y el entorno mediante mediciones, de manera particular se centra en obtener los valores RSS para distintos puntos del área en la que se va a realizar la localización. Mediante estas mediciones se pueden estimar los factores de pérdida de señal requeridos para las técnicas basadas en distancia y también se pueden crear los mapas de señal para las técnicas basadas en perfilamiento.

► Filtrado de valores

Debido a las variaciones usuales en los valores RSS causados por motivos como múltiples trayectorias de la señal, interferencias y otros motivos, esta etapa es de gran importancia para buscar tener una medición estable. Se pueden utilizar distintos métodos como los filtros gaussianos, filtros de Kalman o inclusive métodos como el promedio, todos distintos mecanismos con el único propósito de reducir el ruido en las mediciones.

► Selección de nodos

La selección de los nodos que participan en el proceso de localización es algo fundamental para la precisión del sistema. En esta etapa principalmente se busca excluir los nodos en los que la señal sea recibida con demasiado ruido o demasiada variabilidad. De no realizarse este proceso, podría afectar las estimaciones de distancia en el proceso de localización o generar mediciones que no se ajusten a los mapas de RSS existentes.

► Localización

Una vez completadas las etapas anteriores se procede a la estimación de la posición del nodo objetivo, ya sea por medio de métodos geométricos basados en distancias o por medio de la comparación con los puntos de medición en los mapas de RSS.

Si se trata de técnicas basadas en distancia se pudieran usar métodos como la lateración, algoritmos de máximos y mínimos, centroide geométrico, entre otros.

Si se trata de técnicas basadas en perfilamiento se podría hacer uso de métodos como mínimos cuadrados, regresión logística, máquinas de soporte vectorial, redes neuronales, etc.

2.7 Técnicas de filtrado

Tal como se ha mencionado anteriormente, por la misma naturaleza de las señales, el obtener una medida constante de potencia es algo poco probable, aún más cuando se trata de entornos interiores en los que las alteraciones ambientales tienen efectos en la señal, es por esto por lo que realizar procesos de filtrado puede ser una opción cuando se busca minimizar el efecto de estas interferencias en las mediciones.

2.7.1 Filtro Gaussiano

El filtro Gaussiano es una herramienta versátil que puede ser aplicada en el procesamiento de señales inalámbricas [8], [9], [10], [11], el efecto que tiene sobre los datos de entrada se puede describir como un suavizado en el que se reduce los efectos del ruido aleatorio.

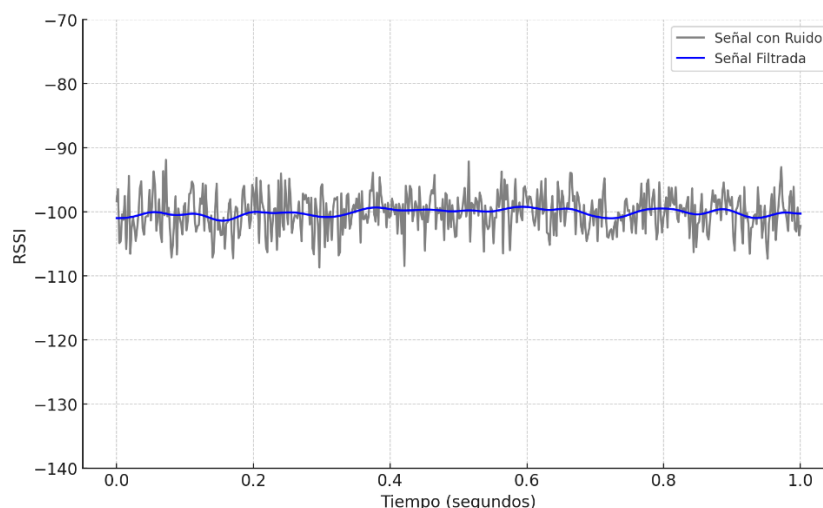


Figura 6. Efecto del filtro Gaussiano en la reducción de ruido

El filtro Gaussiano se basa en la convolución o mezcla de la señal de entrada con una función gaussiana, que tiene características estadísticas particulares como que es simétrica y se caracteriza mediante su media y desviación estándar. Debido a sus características permite atenuar o eliminar picos y demás variaciones drásticas en la señal, lo que también reduce el efecto de los valores extremos.

Para tecnología LoRaWAN, el uso de este filtro puede resultar en distintos beneficios en entornos donde la señal puede llegar a ser distorsionada debido a interferencias, efectos multipath y demás obstáculos que limiten su propagación. Dependiendo de en qué etapa se incorpore el filtro este podría tener efectos como:

- Mejora en la recepción de la señal:

Al aplicar un filtrado en la recepción de las señales electromagnéticas se mejora la relación señal-ruido, o SNR, lo que permite que sea interpretada correctamente de manera más continua.

► Estabilizar el RSSI:

En aplicaciones de localización basada en el indicador de potencia recibida, es muy importante contar con valores estables, por lo que filtrar los valores medidos de este indicador puede llevar a reducir los errores en la estimación de la posición [9], mismo comportamiento que se ha observado en otras tecnologías inalámbricas como BLE [10], [11].

Si bien el filtro gaussiano tiene una buena efectividad, requiere de una elección apropiada del parámetro de desviación estándar que se encarga de la cantidad de suavizado que se aplica, por lo que para encontrar el valor óptimo se requiere de experimentación y ajuste.

2.7.2 Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un algoritmo que se utiliza ampliamente en el procesamiento de señales para poder predecir el estado real de un sistema a partir de una serie de mediciones que se encuentran afectadas por ruido o interferencia. En el contexto de los protocolos de comunicación inalámbrica, este filtro ha mostrado ser muy eficaz mejorando la precisión de las mediciones utilizadas para la localización basada en RSS [8], [10], [11], [12].

El funcionamiento del filtro se basa en la recursividad para procesar todas las mediciones disponibles, las cuales utiliza para estimar el valor real que representan todas las mediciones. Se compone de dos fases principales, la de predicción y la de actualización.

► Predicción:

En esta fase se utilizan datos y características conocidas del sistema junto con la estimación previa del filtro para generar una nueva predicción.

► Actualización:

En esta etapa se toma la medición más reciente y se utiliza para corregir la predicción actual.

En términos generales una de sus principales aplicaciones en LoRaWAN serían el filtrado de mediciones de RSS ruidosas, lo que permite mejorar los cálculos de distancia y de esta manera realizar estimaciones más precisas de la localización del nodo emisor. Adicionalmente, también puede ser utilizado en escenarios donde el nodo se encuentra

en movimiento ya que permite proporcionar estimaciones más precisas de la posición a lo largo del tiempo.

Sin embargo, la implementación de un filtro de Kalman implica distintos desafíos que pudieran llegar a tener cierta complejidad:

▶ **Modelado del sistema:**

Requiere de un modelado matemático preciso del sistema y del entorno en el que se encuentra desplegado, esto puede llegar a ser complejo de obtener y aún más complejos de manejar en entornos con cambios constantes.

▶ **Ajuste de parámetros:**

Los distintos parámetros que componen el filtro, como los valores de covarianza, tienen un impacto significativo en su funcionamiento, por lo que realizar una elección apropiada resulta crucial para obtener todos los beneficios del filtro.

▶ **Costo computacional:**

Particularmente en sistemas complejos, la capacidad de procesamiento requerida para aplicar el filtro puede ser alta, esto puede ser debido a su característica iterativa que requiere realizar más cálculos entre mayor sea la cantidad de muestras o también puede ser debido a la cantidad de características que modelan el sistema que incrementa las dimensiones de las matrices utilizadas.

En conclusión, la implementación del filtro de Kalman en problemas de localización en tecnología LoRaWAN puede ofrecer, de manera teórica, una mejora sustancial en la precisión y confiabilidad de las estimaciones de localización al gestionar de manera eficiente el ruido y las incertidumbres.

2.8 Lateración

La lateración es una técnica básica y fundamental utilizada para lograr la localización de dispositivos, se basa en el uso de varias distancias calculadas desde varios puntos de referencia que son previamente conocidos. En el ámbito de tecnologías como LoRa esta técnica es utilizada en combinación con otros métodos y algoritmos para proporcionar una estimación de la posición de dispositivos de manera precisa.

2.8.1 Conceptos básicos

La lateración, por su funcionamiento, implica determinar la posición de un objeto o dispositivo utilizando las distancias existentes entre dicho objeto con más puntos de referencia. En un plano bidimensional son requeridas al menos tres distancias, las cuales son utilizadas para dibujar círculos cuyo centro es cada punto de referencia y su radio es la distancia estimada al objeto de localización. Finalmente, el punto donde se interceptan los círculos generados corresponde a la ubicación estimada del dispositivo.

En términos matemáticos, dadas las tres coordenadas de los puntos de referencia (x_i, y_i) y las distancias d_i desde estos al dispositivo, se puede crear el siguiente sistema de ecuaciones (donde cada ecuación representa la relación de coordenadas distancia con uno de los puntos de referencia):

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

Mismo que al resolverse, proporciona como resultado la posición (x, y) del dispositivo objetivo.

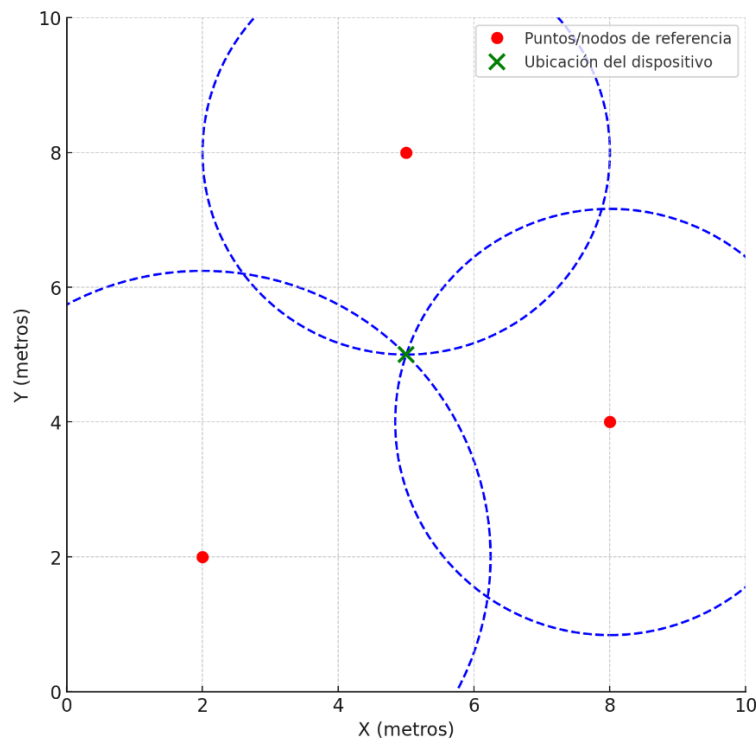


Figura 7. Localización mediante trilateración

2.8.2 Restricciones

Es de gran importancia considerar que existen restricciones sobre la cantidad de mediciones necesarias para proporcionar una estimación única y que sea confiable. Tratándose de un plano bidimensional, o un escenario que pueda simplificarse de dicha manera, al menos tres mediciones y puntos de referencia son necesarios para lograr resolver el sistema de ecuaciones mencionado anteriormente y que este proporcione una solución única.

Por ejemplo, en caso de que se cuente únicamente con dos mediciones, geoméricamente se obtendría una intersección entre dos círculos, lo que a su vez tiene dos posibles resultados, mismos que dependiendo de la situación podrían ser muy distintos uno del otro, lo que generaría ambigüedad.

En un espacio de tres dimensiones, de manera similar, se requieren de al menos cuatro puntos de referencia para poder formar el sistema de ecuaciones deseado y de esta manera poder resolverlo con una solución única.

Las ecuaciones tendrían la forma:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = d_i^2$$

2.8.3 Implementación

Cuando se usa la lateración para localización mediante parámetros medibles de redes de comunicación inalámbrica como LoRa, esta tiene que ser utilizada en conjunto de otras técnicas que permitan traducir u obtener una distancia basados en dichos parámetros. Lo anterior implica que la lateración puede ser utilizada junto con técnicas basadas en distancia como RSS, ToA, TDoA, etc. Siempre y cuando sea posible obtener distancias a partir de dichos parámetros.

Una de sus principales ventajas es que permite obtener ubicaciones de manera precisa y simple, sin importar las condiciones o técnicas mediante las cuales se han obtenido previamente las mediciones entre los dispositivos. Sin embargo, también tiene algunas desventajas a considerar, las interferencias y demás variaciones pueden afectar la solución del sistema de ecuaciones el cual podría requerir de lógica adicional para obtener un resultado (situación que de manera teórica no debería de suceder).

Adicionalmente, la necesidad de múltiples puntos de referencia podría ser un obstáculo en distintos escenarios e implementaciones ya que, si se tiene una menor cantidad de referencias de las matemáticamente necesarias, la lateración no puede obtener una estimación de la ubicación precisa, haciendo necesario la implementación de lógica adicional que podría resultar compleja.

3 ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

El presente trabajo busca el desarrollo de un sistema de localización y seguimiento de dispositivos móviles aprovechando el uso de la tecnología LoRaWAN como aspecto principal, es por esto por lo que se presenta como una oportunidad para explorar y expandir el uso de esta tecnología en aplicaciones que van un paso más allá de los usos originalmente planteados como sería la transmisión de datos.

Dado lo anterior, es crucial abordar y realizar un análisis de los diferentes retos técnicos y oportunidades de innovación que se presenten en la búsqueda de cumplir con los objetivos y lograr el funcionamiento del sistema propuesto.

3.1 Requerimientos y retos principales

► Precisión del sistema

Es de carácter fundamental que el sistema logre alcanzar un nivel de precisión que puede llegar a ser útil en aplicaciones reales, en las que la localización precisa de personas u objetos sea de especial relevancia o crítica. Este aspecto es probablemente el principal determinante del éxito del sistema, por lo que esta característica debe de ser medida y optimizada durante las pruebas para garantizar que cumple con las expectativas.

► Bajo consumo energético

La durabilidad de las baterías y la eficiencia energética son cruciales dado a que la intención es que los dispositivos que interactúen con el sistema funcionen de manera prolongada sin la necesidad de requerir estar conectados a fuentes de energía adicionales frecuentemente.

Este factor es especialmente importante en situaciones en los que el dispositivo a localizar se encuentra en un entorno o en un contexto en el que realizarle mantenimiento no es práctico. Similar a lo anterior, otro motivo por el que la necesidad de recargas frecuentes se debe de evitar es por la comodidad de las personas que podrían estar utilizando el sistema.

► Escalabilidad y flexibilidad

El sistema debe de ser capaz de adaptarse a diferentes escalas y tipos de implementación, mismas que podrían ir desde despliegues pequeños en áreas reducidas hasta grandes sistemas de rastreo que podrían buscar cubrir un área amplia o tener una precisión superior.

Aunado a lo anterior, el sistema debe de poseer la capacidad y flexibilidad para integrarse con otras tecnologías y sistemas existentes, ya sea por ofrecer los mecanismos necesarios para ello o por la capacidad de realizar modificaciones a este de manera sencilla. Todo con el fin de permitir al sistema ser adaptado a diferentes escenarios de uso.

3.2 Análisis del diseño conceptual

Para abordar los retos y desafíos mencionados anteriormente, el diseño del sistema tiene que considerar los siguientes puntos clave:

- ▶ Utilización de técnicas de localización existentes

Se deben de investigar y explorar el uso de diversas técnicas de localización que han demostrado previamente ser eficientes y funcionales, como las técnicas RSS, ToA, TDoA, etc. Finalmente se tiene que optar por una de ellas, que logre ofrecer la mejor combinación de precisión, eficiencia energética y facilidad de implementación en distintos entornos.

- ▶ Transmisión eficiente

En última instancia e independientemente de la técnica de localización que sea elegida, los dispositivos del sistema tendrán la necesidad de emitir mensajes de manera periódica para poder ser localizados, es por esto que se debe de encontrar un balance apropiado que permita obtener la precisión deseada al mismo tiempo que cumpla con los objetivos de eficiencia energética.

- ▶ Diseño modular y configurable

El sistema debe de ser diseñado de manera modular y de tal manera que permita ser incorporado fácilmente a otros sistemas existentes o modificado para cumplir con las necesidades específicas del usuario final. Esto incluye la capacidad para cambiar o agregar módulos sin la necesidad de realizar adaptaciones mayores para incorporarlos.

Lo anterior podría ir desde la elección de los canales de frecuencia deseados para la transmisión, la información enviada, los intervalos de transmisión, las técnicas de localización utilizadas, etc.

- ▶ Interfaz y conectividad

Se deben de implementar interfaces informativas para el usuario que sean intuitivas y fáciles de entender. Esto, cumpliendo con el apartado anterior, debe de poder ser modificable, por lo que las interfaces de comunicación internas del sistema deben de estar disponibles para poder permitir la integración de interfaces nuevas.

3.3 Evaluación y pruebas necesarias

El sistema debe de incluir una fase de evaluación y medición donde se realicen las pruebas necesarias para determinar su rendimiento. Estas pruebas deben de realizarse inicialmente en entornos controlados para después llevarlas a situaciones más cercanas a la realidad en las que se pueda verificar la precisión y el consumo energético. Estas pruebas deben de permitir identificar posibles mejoras y cambios que se tengan que aplicar al sistema para cumplir con las expectativas.

3.4 Diseño de la solución

El desarrollo del sistema de localización planteado presenta desafíos y requerimientos particulares y únicos, mismos que requieren de un enfoque detallado y adaptado a la realidad que permitan lograr una solución factible. Dado lo anterior, el sistema propuesto se compone de dos elementos esenciales que funcionan de manera integrada pero que también pueden tratarse y ser considerados como entidades individuales, el Dispositivo final y el Procesado y herramientas.

Cada uno de los elementos cumple con funciones críticas y esenciales dentro del sistema en general, pero que interactúan entre sí para proporcionar el resultado esperado que da pie a la solución integral de localización de dispositivos móviles utilizando LoRaWAN.

La solución propuesta contempla el uso de dispositivos finales con conectividad LoRaWAN y un sensor GPS, buscando que con estas dos características se pueda realizar una localización del dispositivo tanto en interiores como en exteriores. Adicionalmente, la solución tomará como punto de partida la técnica de posicionamiento por perfilamiento de RSS.

3.4.1 Dispositivo final

Se trata de un dispositivo electrónico que tenga los elementos hardware necesarios para comunicarse con la red LoRaWAN, leer información GPS, mostrar información al usuario, contar con una batería que proporcione un cierto nivel de autonomía eléctrica. Este dispositivo será el elemento que será localizado, por lo que tendrá que estar en contacto directo con la persona u objeto de interés por ubicar.

El diseño del dispositivo final se centra en la optimización de la eficiencia operativa y de su interacción con el usuario, procurando que esta tenga que ser la mínima posible. Entre las características que debe de proporcionar este elemento se encuentra la capacidad de poder ajustar el intervalo de transmisión de los mensajes, tanto a nivel de programación como a un nivel controlado por el usuario.

El dispositivo debe de tener una funcionalidad que le permita operar en el menor consumo energético posible, y este debe de poder ser integrado a la rutina de funcionamiento habitual del dispositivo, pero también debe de poder ser controlado por el usuario. Garantizando que en caso de decidir que el uso del dispositivo no es necesario en un momento determinado este pueda ahorrar la mayor cantidad de energía posible.

Aunque la visualización de cualquier tipo de información en el mismo dispositivo no se considera algo crítico, debe de existir la posibilidad para el usuario final de ver algunos parámetros que puedan ser relevantes, tales como, el nivel de batería, el estado de los sensores y la actividad de transmisión de mensajes. Esta información debe de tener el principal objetivo de poder dar a conocer al usuario el estado actual de funcionamiento del dispositivo.

En relación con lo anterior, la información que es mostrada al usuario, es decir que es recolectada o generada en el dispositivo, debe de ser capaz de ser transmitida a la red de comunicación con los otros elementos del sistema.

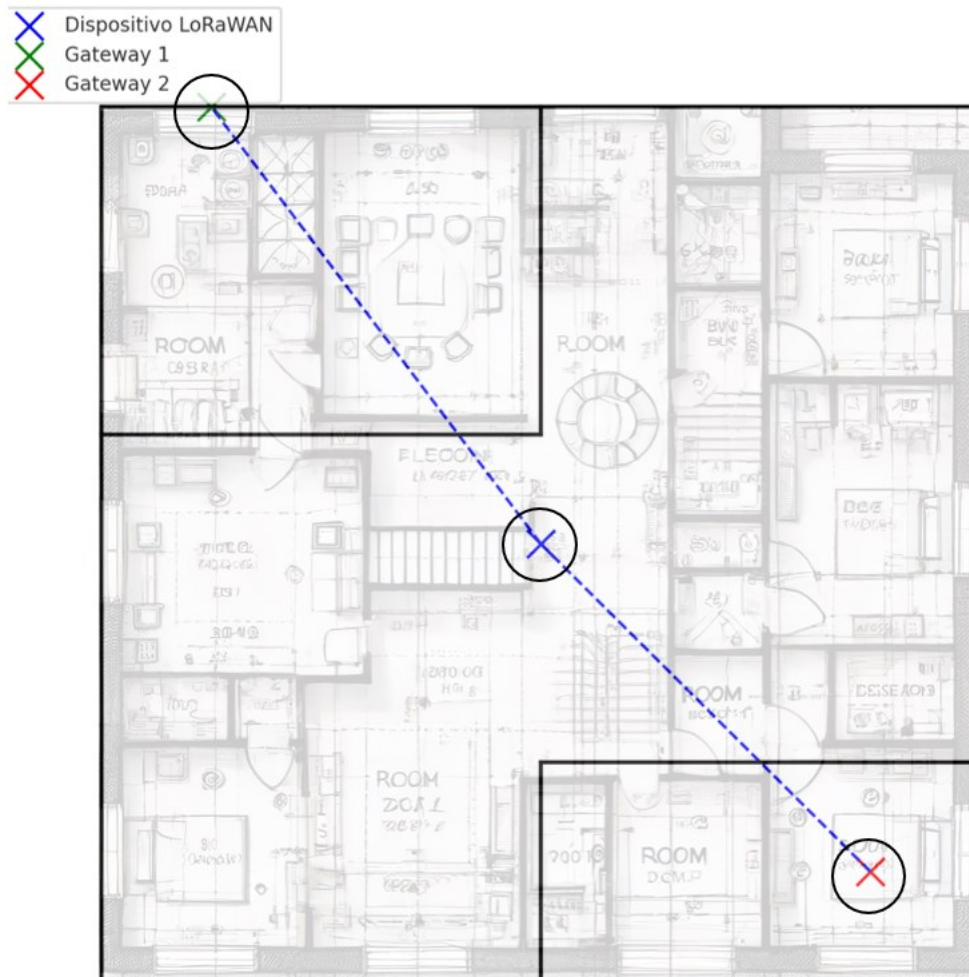


Figura 8. Recepción de mensaje por gateways LoRaWAN en interiores

En términos generales, el dispositivo debe de poder ser configurado de tal manera que transmita la información que se considere necesaria por el sistema para realizar la correcta localización.

Las ideas que fueron descritas anteriormente, y que serán explicadas con mayor detalle a continuación, son representadas mediante el siguiente diagrama de flujo:

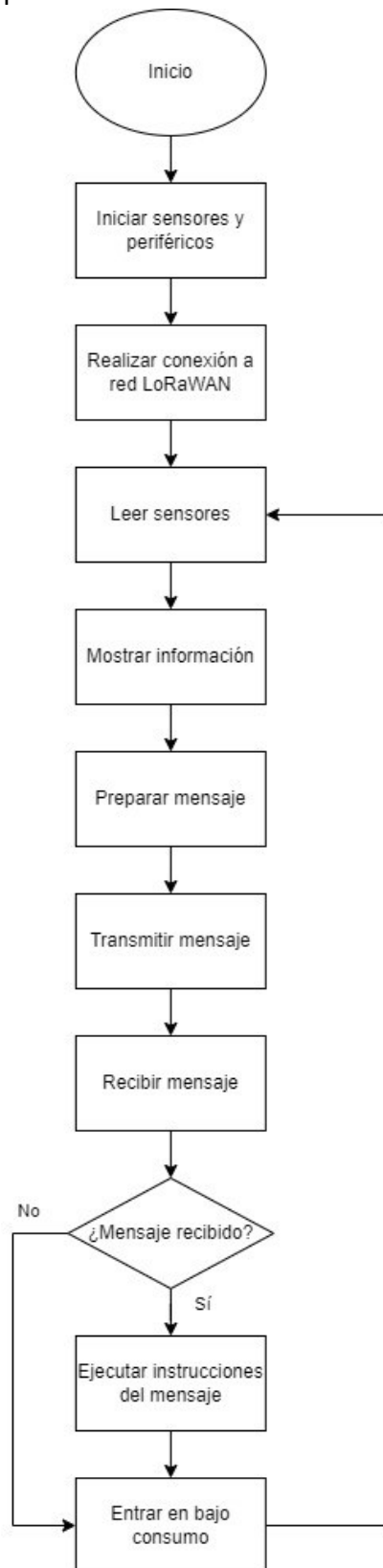


Figura 9. Diagrama de flujo del funcionamiento del dispositivo final

El diagrama se detalla a continuación:

- ▶ Inicio: El proceso comienza al encender el dispositivo o luego de que este sea reiniciado por el usuario, en este sentido el funcionamiento está ideado para que sea de manera continua, es decir, no se contempla propiamente que exista un momento en el que se considere que el proceso que realiza el dispositivo deba de concluir.
- ▶ Iniciar sensores y periféricos: El dispositivo activa y configura los componentes y sensores necesarios para su funcionamiento, estos incluyen los módulos más básicos como temporizadores e interfaces de comunicación. Adicionalmente y debido al diseño del sistema, se requiere la puesta en funcionamiento del módulo GPS, módulo de medición de la batería y módulo de comunicación LoRa.
- ▶ Realizar conexión a red LoRaWAN: El dispositivo debe de establecer una conexión con la red LoRaWAN siguiendo el procedimiento estándar que define el protocolo de la red, que se basa en transmitir un mensaje de solicitud de ingreso en el que se incluyen datos que identifican el dispositivo y otros más utilizados para realizar la autenticación de este. Una vez realizada esta transmisión, el dispositivo debe de esperar a recibir la respuesta positiva de la red.
- ▶ Leer sensores: El dispositivo obtiene la medición del nivel de batería mediante la interacción con el módulo correspondiente que es capaz de obtener el voltaje de esta. Luego de esto, se solicita al módulo GPS la ubicación actual del dispositivo, en caso de que esta no sea posible de obtener en el momento se indicará, no se deberá utilizar alguna ubicación anterior o algún otro mecanismo de estimación.
- ▶ Mostrar información: La información que fue recolectada en el paso anterior debe de ser “mostrada” al usuario mediante la interfaz de la se disponga. Dado lo anterior, si se dispone de una pantalla, entonces la información del funcionamiento del dispositivo debe de ser dibujada en ella en este momento. En caso de que únicamente se disponga de una interfaz serie, entonces la información debe de ser transmitida por este medio.
- ▶ Preparar mensaje: El dispositivo debe de tomar las mediciones obtenidas y unificarlas en lo que será la carga útil del mensaje a transmitir, para esto se debe de elegir un formato estandarizado que sea conveniente, ya sea porque es soportado por la red o porque su procesamiento posterior será sencillo. En esta etapa se debe de incluir todos los datos que fueron recolectados, si alguno de ellos fue nulo o no es válido entonces no deberá de ser parte del mensaje a transmitir.

Así mismo, como parte del mensaje a transmitir, se debe de incluir información sobre qué canales LoRa han sido utilizados para enviar los N mensajes anteriores.

- ▶ **Transmitir mensaje:** El mensaje es transmitido a la red LoRaWAN, esta transmisión será simple, es decir, no contendrá mecanismos de retransmisión ni ningún tipo de espera de mensaje de confirmación de recepción.
- ▶ **Recibir mensaje:** El dispositivo, luego de concluir la transmisión, verifica si hay mensajes entrantes provenientes de la red, en caso de no haber simplemente no realiza ninguna acción adicional. En caso de que haya algún mensaje, lo almacena y verifica su contenido, se espera que este mensaje tenga instrucciones como apagar o encender el módulo de GPS, cambiar la tasa de transmisión, cambios de configuración, etc. Estas instrucciones son enviadas desde el sistema de localización por la red LoRaWAN.
- ▶ **Entrar en bajo consumo:** Con el fin de mejorar la eficiencia del consumo de eléctrico, el dispositivo pasa a un estado de bajo consumo, en el que deshabilita y apaga los sensores y demás periféricos, además de detener el flujo de ejecución de su programa. El dispositivo se mantendrá en este estado hasta que se cumpla con un tiempo que es determinado por periodicidad de transmisión de los mensajes, es decir, si se deben de transmitir cada N segundos, entonces el dispositivo estará en este modo N segundos.
- ▶ **Repetir:** Luego de haber completado todo el proceso y haber despertado del modo de bajo consumo, el dispositivo continúa con su proceso de ejecución volviendo a la etapa de lectura de sensores, desde la cual continuará como se ha descrito anteriormente.

3.4.2 Procesado y herramientas

En cuanto al procesamiento de los datos, el sistema debe de estar compuesto por distintos módulos que cumplen funciones específicas, esto con el propósito de favorecer la flexibilidad y capacidad de modificación del sistema. Estos módulos al menos deben de cumplir con las necesidades requeridas para lograr la funcionalidad principal que es realizar el cálculo de la localización de los dispositivos.

La propuesta de solución contempla la existencia de los siguientes módulos:

- ▶ **Obtención de datos:**

Este módulo es responsable de la recolección y el preprocesamiento de todos los datos provenientes de los dispositivos finales por la red. Su función principal es asegurar que la información necesaria para la localización esté presente y en

una estructura apropiada para que dichos datos puedan ser consumidos por el resto de los módulos.

Algunos de los datos más relevantes son las coordenadas GPS, la intensidad de la señal recibida (RSS), los canales utilizados para transmisiones previas y los nodos que recibieron el mensaje.

► Localización:

Es la etapa de mayor procesado del sistema, está ideada para trabajar de forma continua procesando datos de los dispositivos mediante la interacción con el módulo encargado de eso. Este módulo implementa distintos algoritmos de localización basados en las técnicas de perfilamiento RSS, realizando una serie de cálculos para determinar la ubicación en la que el dispositivo es más probable que se encuentre, realizando una adaptación de la clasificación mediante la técnica de mínimos cuadrados.

Lo anterior tiene que realizarse considerando los datos disponibles y la posibilidad de que hayan existido mensajes que se hayan perdido por distintas circunstancias ambientales, por lo que los cálculos deben de estar adaptados para afrontar dichas situaciones.

► Simulación del sistema:

Para validar y optimizar el funcionamiento del sistema antes de su despliegue en un ambiente real, o antes de realizar las pruebas en sitio, este módulo tiene el objetivo de proporcionar una estimación de la funcionalidad real del sistema, proporcionando datos relevantes como la precisión de este luego de una ejecución de una serie de pruebas.

Adicionalmente, este módulo permite hacer la comparación entre distintas técnicas o configuraciones en los algoritmos implementados para la localización, permitiendo observar el impacto que tiene la elección de distintos parámetros en la respuesta del sistema ya sea impactando su precisión, su tolerancia a fallos etc.

Cabe resaltar que tanto el proceso de localización como el de simulación dependen de la generación previa de un mapa de ubicaciones, es decir, el resultado de realizar un proceso de perfilamiento RSS en la zona en donde será desplegado el sistema. La propuesta respecto a este tema sería realizar una división por secciones en la zona de despliegue, y a partir de esta división obtener las medidas de RSS observadas para cada una de ellas.

Relacionado a lo anterior, para poder asociar una coordenada geográfica a las ubicaciones interiores se deberá crear una relación que haga la relación entre cada ubicación en el mapa RSS con una respectiva coordenada.

3.4.2.1 Proceso de localización

El sistema de procesado y localización descrito anteriormente debe de tener el comportamiento que se muestra a continuación mediante el siguiente diagrama de flujo:

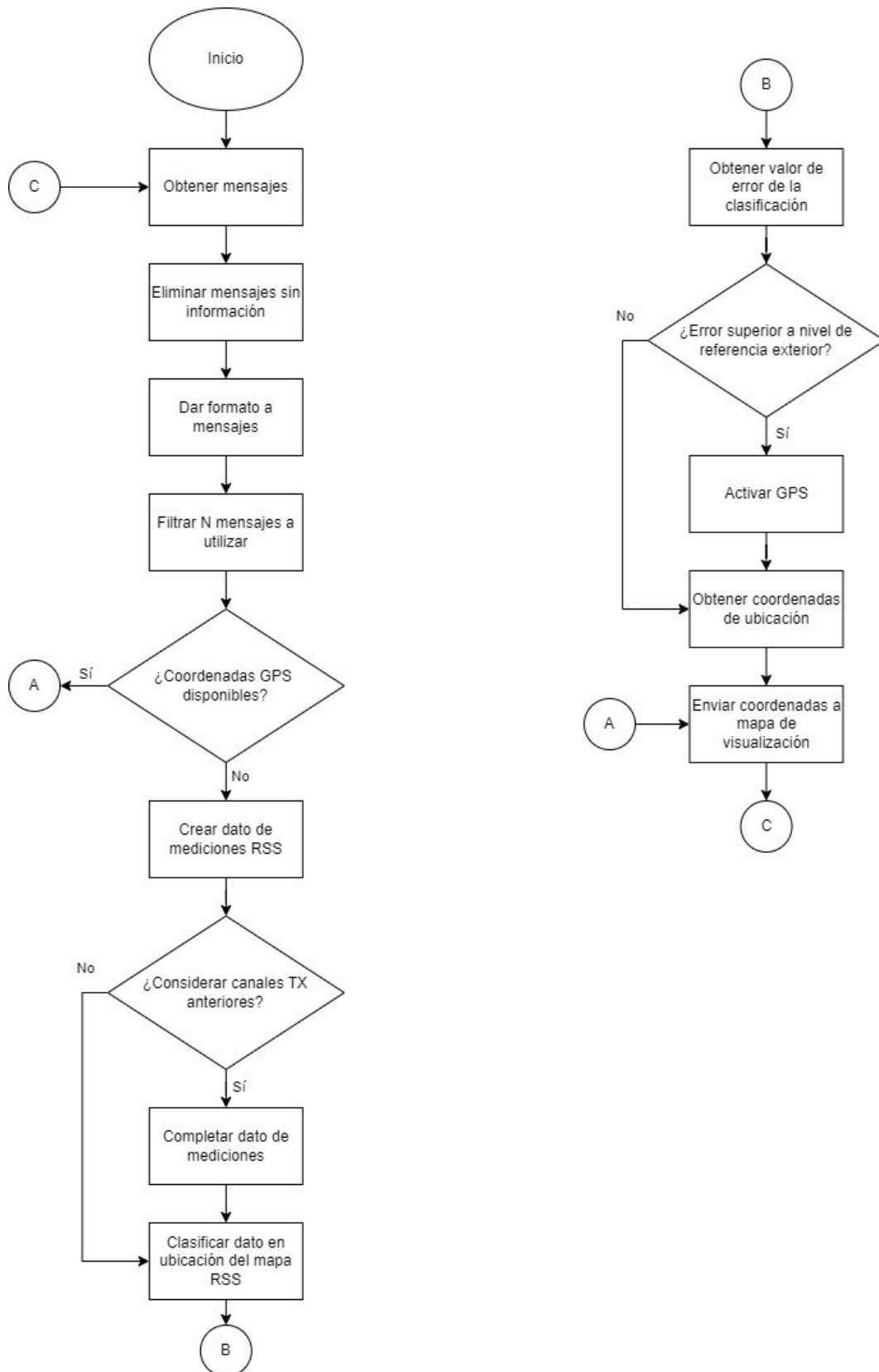


Figura 10. Diagrama de flujo del proceso de localización

El diagrama se detalla a continuación:

- ▶ Inicio: El proceso inicia en el momento que se desea comenzar a localizar el dispositivo final. A diferencia del dispositivo final, este proceso debe poder ser realizado en cualquier equipo de cómputo que tenga las capacidades de ejecución de este algoritmo, en ese sentido el inicio será justamente cuando se comience con la ejecución del código asociado.
- ▶ Obtener mensajes: Se realiza una conexión con la red LoRaWAN y se solicitan los mensajes asociados a las transmisiones realizadas por el dispositivo final, obteniendo de esta manera un listado de los datos que se han transmitido junto con el conjunto de metadatos que la misma red le agrega a los mensajes. Lo anterior es particularmente importante puesto que en esta información se debería de obtener el instante de tiempo en que fue recibido el mensaje, en qué gateways y con qué nivel de potencia.
- ▶ Eliminar mensajes sin información: Dada la naturaleza de la red, es posible que se tengan registradas transmisiones incompletas o cuya información fue perdida durante el tránsito del mensaje, es por esto por lo que se tiene que realizar un filtrado de los mensajes obtenidos para poderlos trabajar posteriormente de manera uniforme. En caso de que algún mensaje no contenga los datos necesarios debe de ser descartado. Los datos necesarios son: como, carga útil, tiempo de recepción, nivel de potencia y gateways que lo recibieron.
- ▶ Dar formato a mensajes: El listado de mensajes obtenido puede llegar a tener más información de la que necesita el sistema para realizar su funcionamiento, esto debido a que la misma red LoRaWAN puede agregar una gran cantidad de metadatos. Con el fin de limpiar los datos y mantener únicamente la información necesaria todos los mensajes deben de ser procesados de tal manera que se formen mensajes nuevos con un formato estandarizado que permita su correcto procesado en etapas posteriores.
- ▶ Filtrar N mensajes a utilizar: El proceso de localización permite trabajar con una cantidad predefinida de mensajes con los que sea realizará el cálculo de la ubicación. En este paso se obtienen los últimos N mensajes que fueron generados en el paso anterior, estos son los que serán utilizados en conjunto para obtener la ubicación.
- ▶ Disponibilidad de coordenadas GPS: En caso de que, en los N mensajes obtenidos, alguno de ellos tenga entre sus datos coordenadas GPS entonces serán usadas como localización del dispositivo directamente. En caso de que varios mensajes tengan información de GPS será utilizada la del mensaje más reciente.

- ▶ Crear dato de mediciones RSS: En esta etapa se crea el dato en concreto que será utilizado para realizar los cálculos de localización mediante los valores de RSS. Para esto, se toman los valores de potencia y canal con los que fue recibido el mensaje por cada gateway y se forma un dato compuesto con esta información. En caso de existir canales repetidos, es decir, que fueron utilizados en más de una ocasión, se deberá tomar como valor RSS el promedio de las potencias recibidas.

Además, en caso de que algún gateway no reciba algún mensaje, pero algún otro sí, se le asigna al valor RSS del canal el valor RSS_NULL.

El valor RSS_NULL es un valor que busca representar la ausencia de medición o de recepción de la señal, aunque intuitivamente pudiera suponerse el valor de cero, el funcionamiento del algoritmo pudiera verse afectado si se elige un valor arbitrario aleatorio. La propuesta para determinar este valor es mediante un proceso de optimización haciendo uso del proceso de simulación que se describe más adelante.

Dada la importancia de este paso se describirá mediante un ejemplo del comportamiento esperado:

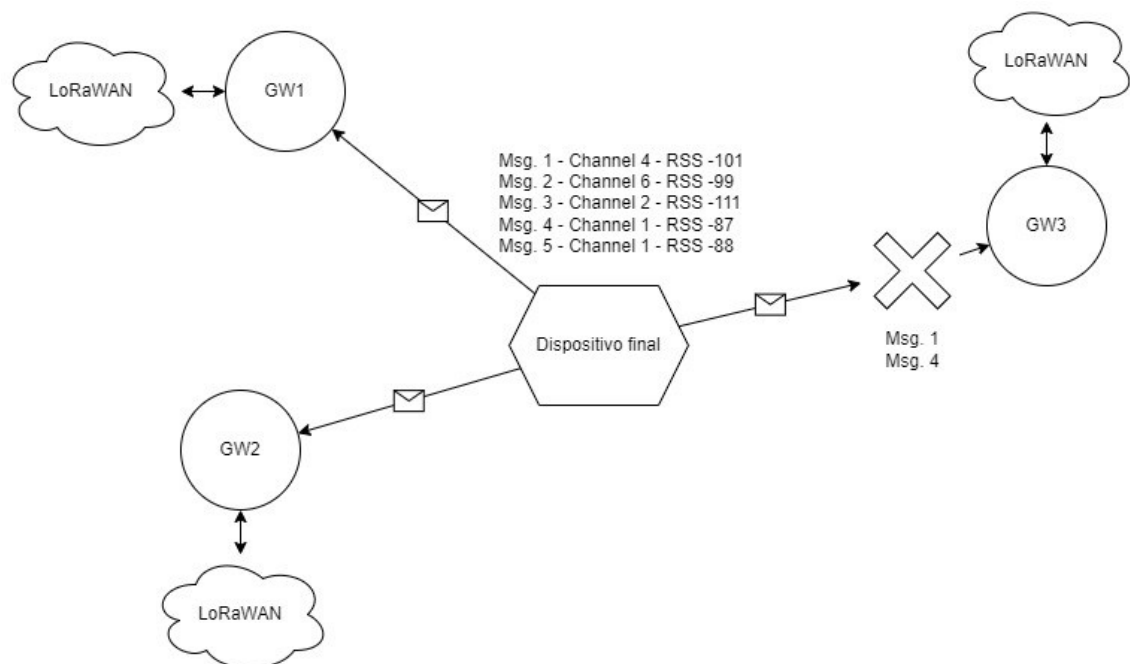


Figura 11. Ejemplo de transmisión de mensajes mediante LoRa

En la figura anterior se ilustra la transmisión de cinco mensajes (y se asume que el sistema está configurado para trabajar considerando cinco mensajes) desde el dispositivo final a la red LoRaWAN, en la que también se puede apreciar los canales utilizados para la transmisión y la potencia asociada. Adicionalmente, se muestra que por algún motivo los mensajes 1 y 4 no fueron recibidos por el GW3.

Por simplicidad se está suponiendo que las potencias de recepción fueron las mismas para todos los gateways, algo que se aleja totalmente de la realidad, sin embargo, para ilustrar esta etapa es suficiente.

Dado este escenario, lo que se espera de esta etapa es que se genere un dato que contenga la siguiente información:

Tabla 2. Ejemplo de información del dato de mediciones RSS

Gateway	Potencias
GW1	Ch1: -87.5, Ch2: -111, Ch4: -101, Ch6: -99
GW2	Ch1: -87.5, Ch2: -111, Ch4: -101, Ch6: -99
GW3	Ch1: -88, Ch2: -111, Ch4: RSS_NULL, Ch6: -99

Como se puede notar, debido a que un par de mensajes no fueron recibidos por el GW3, los valores RSS asociados a estos mensajes no aparecerán en el registro de dicho gateway en el dato de mediciones formado en esta etapa.

- ▶ Decidir sobre uso de canales anteriores: Según la manera en que se quiera configurar el sistema, el proceso de localización puede tener un paso extra en el proceso de preparar el dato, este paso se trata de considerar canales de transmisión usados anteriormente para completar el dato de mediciones RSS. Estas acciones serán descritas en el siguiente punto.
- ▶ Completar dato de mediciones: La idea es que, en caso de que algún mensaje se pierda o no llegue a algún gateway, esto pueda ser detectado mediante los mensajes posteriores con la finalidad de completar la información obtenida de la red indicando que esa transmisión fue perdida.

De manera más concreta, la información de los canales utilizados se debe de obtener del mensaje más reciente, esta información contiene la información de los canales utilizados para la transmisión de los últimos N mensajes. A partir de esto se completa el dato de mediciones RSS escribiendo en el registro del valor de potencia de dicho canal un RSS_NULL.

A continuación, se describe un ejemplo de esta etapa:

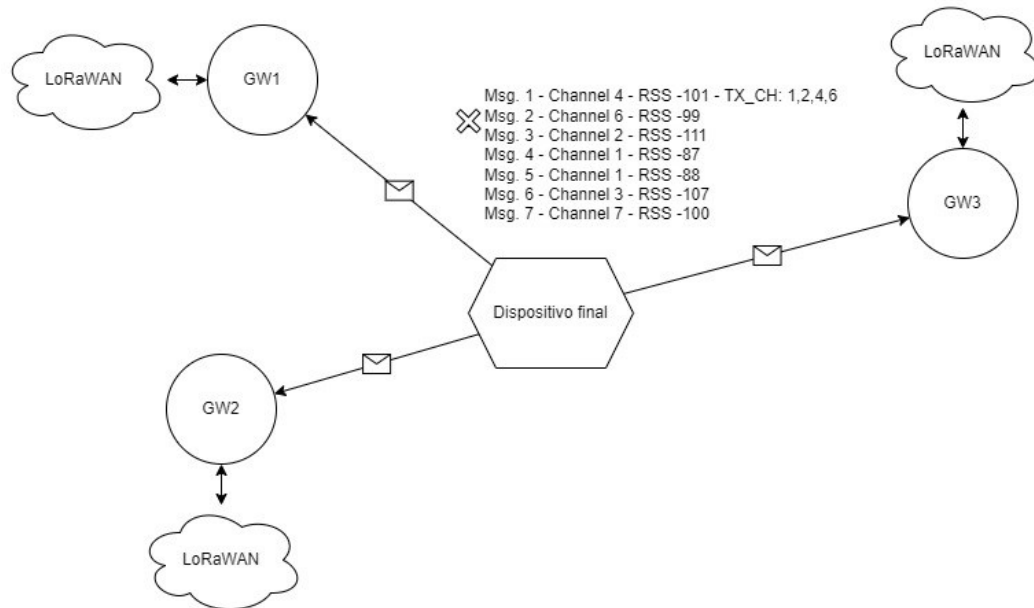


Figura 12. Ejemplo de pérdida de mensajes en red LoRa

En la figura anterior se muestra un escenario en el que se han transmitido siete mensajes, pero el mensaje 2 y 3 se han perdido (y se asume que el sistema está configurado para trabajar considerando cinco mensajes) en la transmisión y ningún gateway los ha recibido. Al igual que en el escenario anterior se está suponiendo que los RSS son uniformes en los GW. Dado este escenario, el dato de mediciones RSS sería como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3. Ejemplo de dato de mediciones RSS con pérdida de mensajes

Gateway	Potencias
GW1	Ch1: -87.5, Ch3: -107, Ch4: -101, Ch7: -100
GW2	Ch1: -87.5, Ch3: -107, Ch4: -101, Ch7: -100
GW3	Ch1: -87.5, Ch3: -107, Ch4: -101, Ch7: -100

Mediante el historial de mensajes utilizados obtenido del mensaje más reciente (por simplicidad únicamente se indica el valor de este dato en dicho mensaje, pero está presente respectivamente en los demás mensajes) se procede a completar el dato de mediciones RSS como se muestra a continuación:

Tabla 4. Ejemplo de dato de mediciones RSS considerando historial

Gateway	Potencias
GW1	Ch1: -87.5, Ch2: RSS_NULL , Ch3: -107, Ch4: -101, Ch6: RSS_NULL , Ch7: -100
GW2	Ch1: -87.5, Ch2: RSS_NULL , Ch3: -107, Ch4: -101, Ch6: RSS_NULL , Ch7: -100
GW3	Ch1: -87.5, Ch2: RSS_NULL , Ch3: -107, Ch4: -101, Ch6: RSS_NULL , Ch7: -100

Como se puede notar en la tabla, se agregaron como RSS_NULL los valores de potencia medida de los canales asociados a los mensajes que no fueron recibidos. Esto brinda información adicional del entorno puesto que con esta modificación se puede saber que en la posición en la que se encuentra el dispositivo final no alcanza a ningún gateway mediante los canales agregados.

- ▶ Clasificar dato en ubicación del mapa RSS: En esta etapa se debe de realizar una comparación mediante la técnica de mínimos cuadrados entre el dato de mediciones RSS y todas las posibles ubicaciones del mapa RSS. Mediante lo anterior, se determina la similitud entre ambas mediciones, dado esto se elige la ubicación del mapa que presente el menor error y dicha ubicación es la que se elige como localización del dispositivo.
- ▶ Obtener el valor de error de la clasificación: En esta etapa simplemente se obtiene el valor del error de la clasificación, proceso que de manera implícita se realizó en la etapa anterior pero no expresamente con la intención de conservar dicho número.
- ▶ Determinar si el error es mayor a lo esperado: En caso de que se obtenga un valor de error que sea mayor a un nivel de referencia predefinido en el sistema, entonces se podría suponer que el dispositivo se encuentra en una ubicación exterior, por lo que pudiera optarse por activar el GPS y así obtener una ubicación precisa.

Este comportamiento debe de poder ser configurado eligiendo el nivel de referencia que se considere como un error suficientemente alto como para suponer que el dispositivo no se encuentra en interiores.

Además, esta característica deberá poder ser desactivada en caso de que se quiera de esta manera, debido a que podría aumentar el consumo energético al activar el GPS en momentos en el que no sea necesario o no sea requerido por el usuario final.

- ▶ **Activar GPS:** En caso de que se haya decidido activar el GPS, se enviará un mensaje a la red LoRaWAN con destino al dispositivo final, indicando que debe de activa el sensor GPS. Esto se hará solicitando un Downlink, mismo que debería ser recibido por el dispositivo final la próxima vez que verifique si hay mensajes entrantes disponibles.

- ▶ **Obtener coordenadas de ubicación:** En esta etapa se realiza la consulta de las coordenadas asociadas a la ubicación en la que fue localizado el dispositivo, esto es un proceso sencillo en el cual se revisan los registros existentes y obtiene el dato correspondiente. En caso de ser necesario se le da el formato adecuado para su posterior uso.

- ▶ **Enviar coordenadas a mapa de visualización:** En esta etapa se toma el valor de coordenadas obtenido en el paso anterior y se envía al sistema encargado de gestionar la visualización del mapa, en el cual se deberá de actualizar la posición del marcador.

- ▶ **Repetir:** Una vez llegado a este punto el sistema debe de volver a la etapa de obtención de mensajes. Dependiendo de la velocidad con la que se quiera que se realice el cálculo de localización del dispositivo se podría realizar una espera de un tiempo X antes de volver a comenzar. Es importante mencionar que el principal limitador de la velocidad de actualización de la ubicación del dispositivo es el propio dispositivo, puesto que este sistema depende de los mensajes que envía, en ese sentido, no es útil que este proceso se realice, por ejemplo, cada cinco segundos cuando el dispositivo emite mensajes cada treinta segundos.

3.4.2.2 Proceso de simulación

Respecto al módulo de simulación del sistema, aunque en términos generales tendría que ser similar al proceso de localización regular, existen distintos procesos que tendrán que ser simplificados o abordados de una manera diferente, particularmente, la obtención de datos sería simulada mediante datos previamente recolectados y clasificados.

Por otro lado, este proceso está ideado específicamente para evaluar el comportamiento del sistema de localización en ambientes interiores, es decir, mediante el proceso de cálculo de potencias recibidas. Lo anterior implica que para este proceso deberán de ignorarse o no incluirse coordenadas GPS.

El diagrama de flujo sería el siguiente:

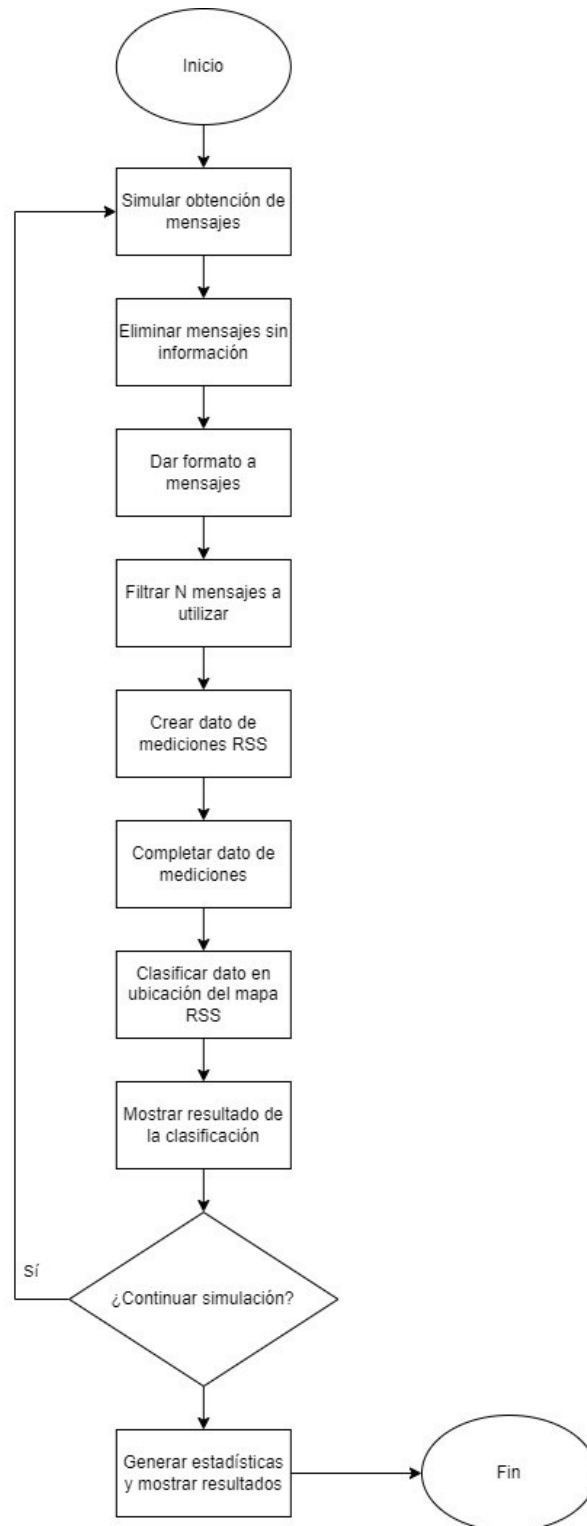


Figura 13. Diagrama de flujo del proceso de simulación

El diagrama se detalla a continuación:

- ▶ Inicio: El proceso comienza cuando se desea realizar una simulación del sistema y obtener métricas que permita evaluar la precisión de este. El inicio será justamente cuando se comience con la ejecución del código asociado.

- ▶ Simular obtención de mensajes: En esta etapa se obtienen mensajes que se asemejan en características y valores a los reales, con la única diferencia de que estos han sido previamente recolectados y se sabe con certeza a qué ubicación pertenecen.
- ▶ Eliminación de mensajes sin información: Descrito en la sección anterior.
- ▶ Dar formato a mensajes: Descrito en la sección anterior.
- ▶ Filtrar N mensajes a utilizar: Descrito en la sección anterior.
- ▶ Crear dato de medición RSS: Descrito en la sección anterior.
- ▶ Completar dato de mediciones: Descrito en la sección anterior.
- ▶ Clasificar dato en ubicación del mapa RSS: Descrito en la sección anterior.
- ▶ Mostrar resultado de la clasificación: En esta etapa se almacenará y mostrará el resultado de la clasificación, mismo que se tratará de una ubicación interior y por tanto una ubicación en el mapa de RSS. Adicional a la respuesta del proceso de localización, se mostrará la ubicación “real”, es decir, en la que fueron enviados los mensajes originalmente (información conocida debido a que los datos se recolectaron previamente).
- ▶ Decidir si continuar con la simulación: En esta etapa se tiene que decidir si se continua o no con la simulación. Dependiendo de las necesidades, podría ser posible que el sistema esté configurado para realizar una N cantidad de simulaciones antes de detenerse automáticamente.
- ▶ Generar estadísticas y mostrar resultados: Se debe de mostrar al usuario información sobre el porcentaje de aciertos que logró el sistema, es decir, la cantidad de veces que el proceso de localización clasificó correctamente en la ubicación del mapa RSS. Así mismo puede mostrarse información adicional como la tasa de acierto por ubicaciones.
- ▶ Fin: Una vez concluido el proceso de simulación se espera que se haya generado información valiosa para evaluar el comportamiento del sistema, de tal manera que se pueda decidir si modificar valores como la cantidad de mensajes utilizados para realizar la clasificación o el valor de RSS_NULL.

4 IMPLEMENTACIÓN

Al igual que el diseño de la solución, en la implementación también pueden verse los distintos componentes del sistema de manera individual, lo que de forma práctica se traduce a una disminución de las interdependencias y una mejora en la eficiencia y simplicidad al momento de realizar modificaciones al sistema.

Los códigos y herramientas utilizadas en la implementación están descritas en el apartado de Anexos, en donde se ofrece una explicación con mayor detalle y enlaces a los repositorios que contienen los archivos fuente.

La implementación y las pruebas fueron realizadas en el edificio 1G de la Universitat Politècnica de València. La red LoRaWAN sobre la que se trabajó esta implementación es la llamada The Things Network (TTN) que servirá como infraestructura de red principal, a la que el dispositivo final puede conectarse mediante los gateways que están asociados a dicha red.

4.1 Dispositivo final

Para la implementación del dispositivo final primeramente se seleccionó un dispositivo hardware que cumpliera con los requerimientos inherentes del sistema y que estuviera dentro de lo que es requerido por los objetivos.

Debido a esto, fue seleccionado el dispositivo T-Impulse de la marca LilyGO. que cuenta con las siguientes características:

- ▶ Módulo LoRa SX1276 utilizando la frecuencia EU868
- ▶ Módulo GNSS compatible con GPS, GLONASS, SBAS y QZSS L1-CA
- ▶ Botón táctil capacitivo TTP223
- ▶ Pantalla OLED SSD1306 de 0.49 pulgadas
- ▶ Batería con capacidad de 200 mAh



Figura 14. LilyGO T-IMPULSE

El dispositivo fue configurado de tal manera que emite un mensaje aproximadamente cada 20 segundos, de los cuales 15 segundos se dan entre el final de una transmisión

y el inicio de la siguiente, además, el dispositivo demora aproximadamente 5 segundos en completar una transmisión.

La programación del dispositivo se realiza haciendo uso de la plataforma PlatformIO, que se compone de una serie de herramientas de desarrollo para sistemas empujados que se instalan a manera de extensión sobre el programa Visual Studio Code. Esta herramienta permite el compilado y carga del firmware directamente en el dispositivo T-IMPULSE mediante el puerto serie.

Luego del primer inicio o al reiniciar el dispositivo, se comienza con un proceso de ingreso a la red LoRaWAN, esto se produce mediante el envío de una solicitud de Join que el dispositivo transmite junto con las claves de acceso a la red. Dicha información se almacena en la ruta, partiendo de la raíz del proyecto, “.secrets/secrets.h” en donde se encuentran las definiciones de los valores de APPEUI, DEVEUI y APPKEY, todos proporcionados por la consola de administración de TTN y necesarios para una conexión correcta.

El mensaje es emitido haciendo uso del formato estándar CayenneLPP, la estructura del mensaje se puede ilustrar de la siguiente estructura:

```
{  
  gps = {gps_latitud, gps_longitud, gps_altura},  
  dev_interior = Interior(1)/Exterior(0),  
  tx_channels_used = 0b0000000,  
  battery_voltage = 0.00  
}
```

En donde los valores de latitud, longitud y altura son los que proporciona el módulo GPS, en caso de no estar encendido o no tener el dato, el registro completo de GPS no se incluye en el mensaje a transmitir.

El parámetro dev_interior hace referencia a si el dispositivo está configurado en modo interior o exterior, donde la principal afectación es que en modo Interior el módulo GPS es deshabilitado y el dispositivo entra en modo de bajo consumo entre transmisiones, mientras que, en el modo exterior, el dispositivo mantiene el módulo de GPS encendido y no se va a modo de bajo consumo nunca.

El parámetro tx_channels_used es el campo en el que se transmite la información de los canales anteriormente usados para transmitir los mensajes. La codificación es de manera binaria, siendo el bit en la posición menos significativa el que representa al canal 0 y así hasta el canal 7. Un 1 representa que el canal ha sido utilizado y un 0 que el canal no ha sido utilizado. Por motivos de la implementación se decidió trabajar con la localización utilizando 5 mensajes, por lo que este campo contiene la información de los 4 últimos mensajes.

El parámetro battery_voltage representa el voltaje actual de la batería del dispositivo con dos decimales de resolución.

Cabe destacar que la estructura mostrada anteriormente es únicamente ilustrativa, en la realidad CayenneLPP tiene una estructura de cadena de dígitos que identifican las variables y sus valores, sin embargo, esto no es relevante para asuntos del sistema.

También, es importante mencionar que el código ejecuta un pequeño sistema operativo que otorga la capacidad de agendar tareas y ejecución de código en el tiempo, de tal manera que se pueden solicitar al sistema la ejecución de distintas rutinas.

Una vez que los datos son preparados para la transmisión, se realiza una solicitud de transmisión al módulo LoRa correspondiente, el que se encargará de efectuar la transmisión según corresponda. Si todo sucede de forma correcta entonces en algunos segundos se ejecutará un callback sobre el evento de transmisión correcta y se volverá a agendar la rutina de transmisión. Durante el callback mencionado, se realizará el proceso de recepción de mensajes, en el que, en caso de que exista alguno, se podrá modificar el estado de la variable de `dev_interior` afectando el estado de encendido o apagado del GPS.

Por motivos de tolerancia a fallos o errores de conectividad, una vez solicitada la transmisión, se agenda el reinicio de la rutina de transmisión, de tal manera que, si no se da el callback correspondiente a una transmisión exitosa, el programa no se detenga.

Luego de lo anterior la información correspondiente es impresa en pantalla, y tal como se muestra en a figura anterior, la información mostrada corresponde al voltaje de la batería, la cantidad de satélites GPS con los que se está sincronizado y el estado de envío de mensajes. Adicionalmente, el indicador de satélites indica cuando el módulo de GPS se encuentra desactivado.

Una vez finalizado el proceso de impresión en pantalla, el dispositivo regresa a realizar las mediciones de los sensores y sus rutinas regulares hasta el momento en que llegue el tiempo de ejecución de la tarea de transmisión.

4.2 Procesado y herramientas

La implementación del sistema y herramientas de localización fue realizada mediante una serie de módulos escritos en lenguaje Python que permiten el correcto procesado de los mensajes obtenidos y enviados a la red The Things Network (TTN) que fue la elegida como red LoRaWAN.

Como se mencionó anteriormente, el código correspondiente se encuentra descrito en la sección de Anexos.

Para poder realizar la localización del dispositivo final se tuvo que realizar un proceso previo que consta del uso de las distintas herramientas con el fin de obtener los datos necesarios para comenzar con el cálculo de la localización propiamente, a continuación, se describirán los pasos seguidos para lograrlo.

4.2.1 Creación del mapa

Para realizar la creación del mapa de ubicaciones del edificio 1G, se ejecutó la herramienta “`map.py`”, teniendo el dispositivo final en la ubicación deseada, utilizando la opción “C” para la definición de los tiempos en cada ubicación, de esta manera, se seleccionaba el inicio y fin de las mediciones por ubicación utilizando reloj del sistema operativo del dispositivo que ejecuta la herramienta.

Estas acciones fueron realizadas durante aproximadamente 20 minutos por ubicación con una tasa de envío de mensajes de uno cada 15 segundos, estos valores fueron

elegidos con la finalidad de tener una cantidad elevada de muestras y así lograr un resultado más general a lo largo del tiempo.



Figura 15. Toma de mediciones con dispositivo final en exterior

Luego de realizar todo este proceso con el total de ubicaciones deseadas la herramienta al término de su ejecución muestra mediante la consola el texto que será utilizado como mapa, el formato es similar a lo siguiente:

```
RSS_NULL = -100
rss_map = {
  '0e': {'main-gtw-grc': {0: -95.0, 1: -93.28571428571429, 2: -92.0, 3: -91.8, 4: -92.0, 5: -90.0, 6: -93.75, 7: -92.71428571428571}, 'rak7248-grc-pm65': {0: RSS_NULL, 1: RSS_NULL, 2: -108.0, 3: RSS_NULL, 4: RSS_NULL, 5: RSS_NULL, 6: RSS_NULL, 7: RSS_NULL}}
,
  '0c': {'main-gtw-grc': {0: -90.84615384615384, 1: -91.0, 2: -91.0, 3: -91.86666666666666, 4: -90.66666666666667, 5: -90.0, 6: -91.83333333333333, 7: -91.33333333333333}, 'rak7248-grc-pm65': {0: -108.0, 1: -109.16666666666667, 2: -107.5, 3: -110.25, 4: -107.16666666666667, 5: -106.5, 6: -108.0, 7: -109.0}}
,
  '0o': {'main-gtw-grc': {0: RSS_NULL, 1: RSS_NULL, 2: RSS_NULL, 3: -100.0, 4: -100.0, 5: -99.0, 6: -101.0, 7: -101.0}, 'rak7248-grc-pm65': {0: -105.0, 1: -103.83333333333333, 2: -102.18181818181819, 3: -105.92307692307692, 4: -104.3076923076923, 5: -103.46153846153847, 6: -103.6923076923077, 7: -105.46153846153847}}
,
}
```

Este texto es en realidad un diccionario de Python que tiene que ser guardado en un archivo para poder ser utilizado, en el caso en particular de esta implementación la ruta es, a partir de la raíz del proyecto, "maps/disca_map.py". Cabe mencionar que el valor de RSS_NULL proporcionado no es necesariamente el óptimo, por lo que más adelante se cambiará.

4.2.2 Toma de mediciones de prueba

Como paso siguiente en el proceso de implementación, en un día distinto se realizó el mismo recorrido que para la creación del mapa, con la diferencia de que en lugar de ejecutar la herramienta "map.py" se ejecutó la herramienta "benchmark.py".

Su funcionamiento inicial es el mismo respecto a su interacción con el usuario para la selección de tiempo de inicio y fin, salvo que primeramente se tiene que seleccionar la opción "R" para hacer uso de mensajes reales y no algunos previamente guardados.

Las muestras fueron recolectadas en distintos puntos cercanos al punto de referencia original (el utilizado para la creación del mapa), la técnica utilizada fue tomar un minuto y medio de mediciones en el punto donde fueron tomadas para el mapa y durante otro minuto y medio tomar muestras en ubicaciones cercanas al punto y estando en movimiento. La distancia al punto de referencia aproximada para este último paso fue de 5m.

4.2.3 Cálculo de mejor RSS_NULL

Una vez finalizada la toma de mediciones del punto anterior, al concluir, inmediatamente la herramienta "benchmark.py" comienza a realizar el cálculo del valor de RSS_NULL que sea óptimo en función al mapa y a las mediciones dadas. Una vez terminado este cálculo el resultado es mostrado en pantalla, este dato es por el que se debería sustituir el valor RSS_NULL que previamente se había escrito en el mapa RSS.

La herramienta benchmark inmediatamente comienza a realizar las pruebas de precisión, sin embargo, estas se realizan con el valor existente de RSS_NULL, por lo que se puede detener la ejecución del programa o permitir que concluya partiendo del hecho de que las pruebas probablemente no se estarán realizando con el RSS_NULL ideal.

4.2.4 Ejecución de benchmark

Luego de modificar el valor de RSS_NULL en el mapa RSS, se puede proceder a ejecutar nuevamente la herramienta "benchmark.py" con las mismas marcas de tiempo que se utilizaron en el punto anterior, para esto podrían introducirse manualmente o mediante una lista tal como indica la propia herramienta.

Una vez introducidas las marcas de tiempo, el proceso de cálculo de mejor RSS_NULL vuelve a iniciar, y posterior a este comienzan las pruebas de precisión del sistema, generando una gráfica al finalizar en donde se muestra el resultado de la ejecución de las pruebas y el porcentaje de aciertos obtenido.

Aunque en sí este paso es opcional debido a que no modifica ningún aspecto del sistema propiamente, es sugerido debido a que podría indicar errores cometidos en pasos previos o situaciones similares, además de proporcionar el comportamiento que se podría esperar en pruebas posteriores.

4.2.5 Ejecución de servidor web

Para mejorar la visualización del resultado del proceso de localización en tiempo real, se desarrolló una pequeña aplicación web que muestra un mapa en el que se dibuja un marcador señalando la posición actual del dispositivo final.

Este proceso únicamente requiere de la ejecución de la herramienta “web_app.py”, inmediatamente comenzará a servir una página web que es accesible en la dirección 127.0.0.1 en el puerto 5000. Esta información también la comunica la propia herramienta.

Si el dispositivo está siendo localizado mediante GPS entonces el marcador es de color azul, en caso de estar siendo posicionado mediante el cálculo de potencias RSS el marcador será de color rojo. Así mismo, al posicionar el cursor sobre el marcador, este mostrará información sobre la altura provista por el GPS o el número de planta interior en caso de que sea ubicado de esta manera.

El mapa está configurado para actualizarse cada 10 segundos, en este punto el marcador mostrado en el mapa se mantendrá estático debido a que no se ha comenzado con el proceso de localización aún, esta herramienta sólo es de visualización.

4.2.6 Proceso de localización

Finalmente, para comenzar el proceso de localización activa del dispositivo final se ejecuta la herramienta “locate.py”, la cuál hay que ejecutar con las opciones “R” y “N”, de esta manera comenzará el proceso de localización y por tanto, el marcador en el mapa comenzará a actualizarse. Así mismo, es posible observar el resultado del proceso de localización en consola.

Aunque puede modificarse, la herramienta se encuentra configurada para localizar utilizando los 5 últimos mensajes transmitidos por el dispositivo y con la opción de considerar el historial de canales desactivada.

4.3 Entorno

Con el fin de definir las ubicaciones para el mapa RSS el edificio fue dividido por pisos y zonas, yendo los pisos del 0 al 3 y las zonas siendo O, C y E. La división por zonas se realizó como se ilustra a continuación.

Las ubicaciones en las que se dividió el edificio de manera más concreta se podrían ver como puntos en el mapa, por lo que al momento de localizar al dispositivo final se selecciona el punto más similar conocido, dado lo anterior, es posible obtener localizaciones “incorrectas” entre más se aleje el dispositivo de la ubicación conocida.



Figura 16. División por zonas del edificio 1G

De esta manera y siguiendo dichas divisiones se tomaron las mediciones necesarias para crear el mapa RSS mediante la herramienta "map.py", misma que está incluida y descrita en el repositorio de herramientas.

La disponibilidad de los gateways LoRa alcanzables desde el interior del edificio es variable según la ubicación concreta, sin embargo, se partió del hecho de que son alcanzables tres gateways distintos: "rak7248-grc-pm65", "main-gtw-grc" y "itaca-upv-022". Cuya ubicación se encuentra distribuida dentro del campus de la UPV.

5 RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de múltiples pruebas y mediciones realizadas al sistema de localización diseñado, sin embargo, se debe de considerar que estos resultados están directamente relacionados con la implementación, lo que implica que una mejor implementación conseguiría mejores resultados y viceversa.

Recordando que este sistema ha sido diseñado para lograr ofrecer una solución tanto eficiente como precisa para la localización de objetos o personas en distintos entornos, a continuación, se presentan las pruebas y evaluaciones realizadas para demostrar el cumplimiento de las características deseadas, como su precisión, eficiencia energética y comportamiento en distintas condiciones operativas.

Primeramente, y como se muestra en la siguiente figura, se realizaron una serie de pruebas de ejecución de la herramienta de benchmark para evaluar la consistencia y repetibilidad del rendimiento del sistema. De manera más concreta la prueba consistió en la creación de 30 conjuntos de prueba distintos y su posterior evaluación.

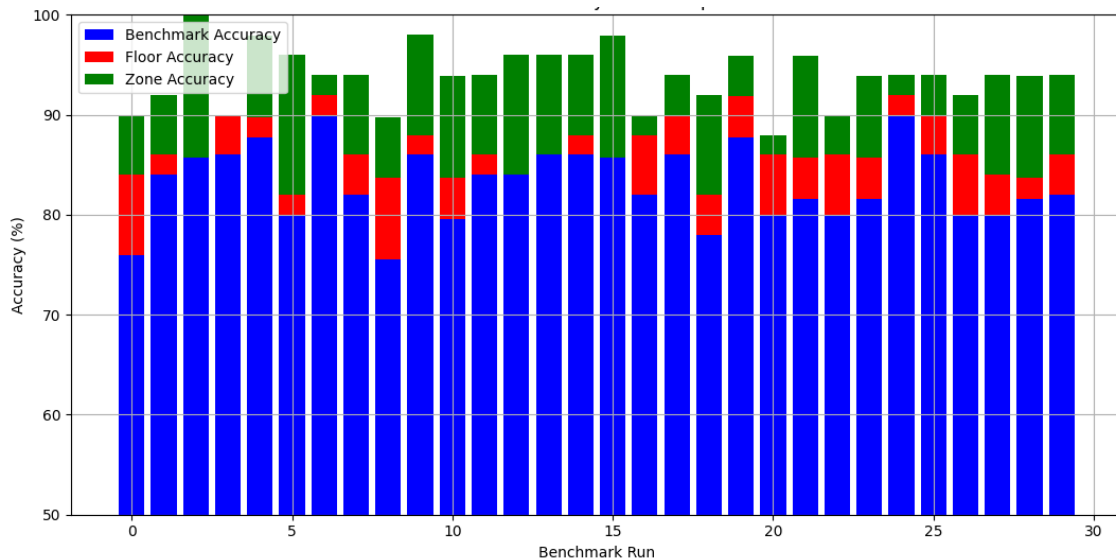


Figura 17. Resultado de ejecución del benchmark múltiples veces

Como se puede observar, el sistema mantiene, al menos en simulaciones, una precisión cercana al 85% con variaciones usualmente dentro de un rango de $\pm 5\%$. Lo que en sí mismo ya es un rendimiento que se podría considerar como aceptable.

A sí mismo, es importante destacar que la precisión del sistema se encuentra en todo momento siendo limitada por la capacidad de predecir el piso o nivel en el que se encuentra el dispositivo, ya que, si únicamente se tomara en cuenta la precisión en el cálculo de la zona, la precisión sería aproximadamente del 95%.

Como aclaración, tener una precisión muy alta no significa que el sistema esté ubicando al dispositivo con una precisión milimétrica o algo equiparable, lo que implica es que el dispositivo está siendo localizado en la ubicación correspondiente según el piso y la zona donde fueron tomadas las muestras.

Se realizó una medición del consumo de energía del dispositivo final con el módulo GPS apagado, transmitiendo cada 20 segundos, y entrando en modo de bajo consumo entre transmisiones. El resultado se puede observar en la figura siguiente.

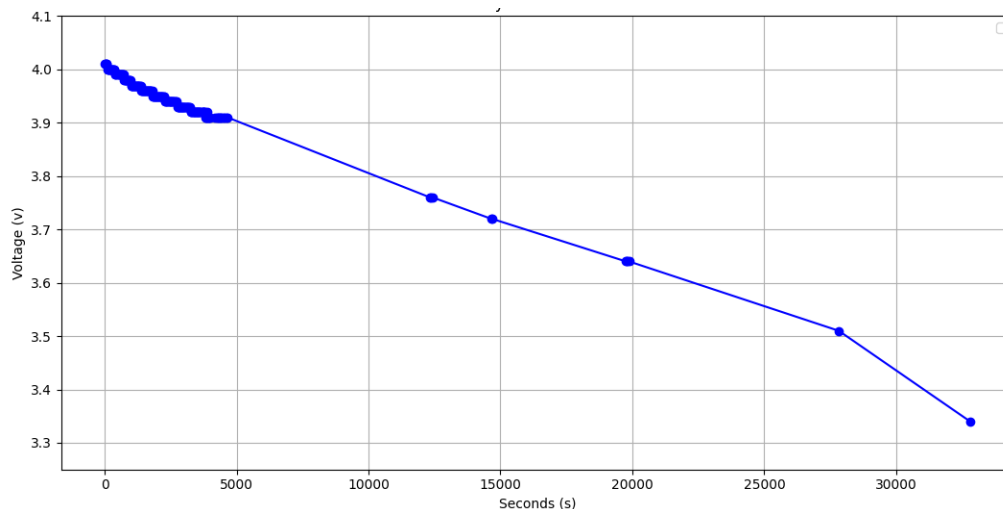


Figura 18. Voltaje de la batería en el tiempo

Se puede observar que el tiempo de funcionamiento fue de aproximadamente 33,000 segundos, lo que es equivalente a 9 horas de uso continuado.

La gráfica presenta una distinta densidad de puntos únicamente por motivos de practicidad al momento de realizar la prueba, sin embargo, los puntos existentes muestran la información más relevante.

Con el fin de demostrar que el algoritmo implementado para localizar en interior es energéticamente muy superior al uso de GPS, se realizó el mismo experimento de observar el voltaje en el tiempo, pero habilitando el módulo GPS, siendo este el único cambio. El resultado se observa en la figura a continuación.

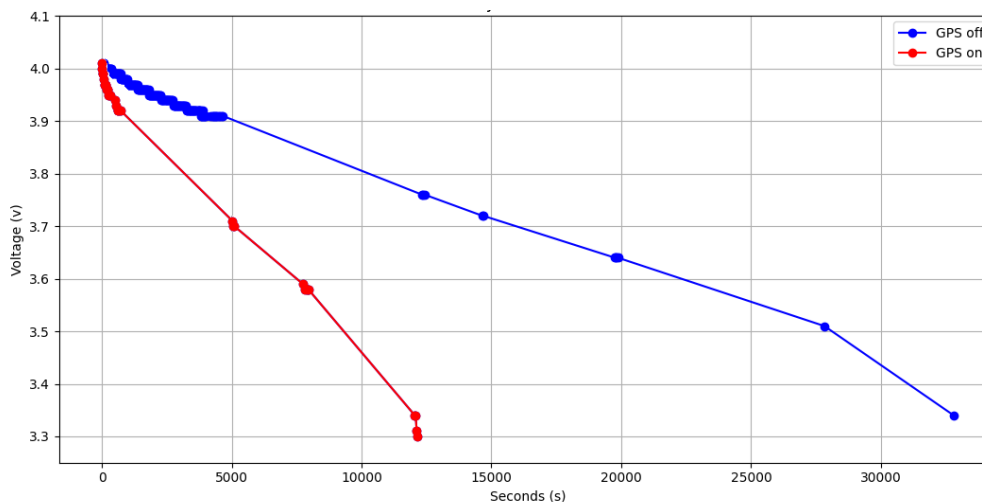


Figura 19. Comparativa de voltaje de la batería con y sin GPS

La línea roja representa el nivel de la batería del dispositivo cuando tiene el GPS habilitado, mientras que la azul cuando está deshabilitado. Puede apreciarse una diferencia de casi el triple de tiempo entre ambos experimentos, lo que deja en evidencia que el módulo GPS supone una carga energética muy elevada, indicando que sólo debería activarse cuando sea estrictamente necesario.

Luego de iniciar con el proceso de localización las coordenadas son transmitidas a la aplicación web, el resultado de esto puede observarse en la siguiente figura, la cual muestra un momento en el que el dispositivo final se encontraba en una ubicación exterior y siendo localizado mediante el sensor GPS.

Se puede notar que el marcador es de color azul, indicando que se trata de una ubicación de GPS y que está correctamente ubicado en el mapa según la información recibida, la ubicación del dispositivo al momento era {'altitude': 19.79, 'latitude': 39.4785, 'longitude': -0.3351}.

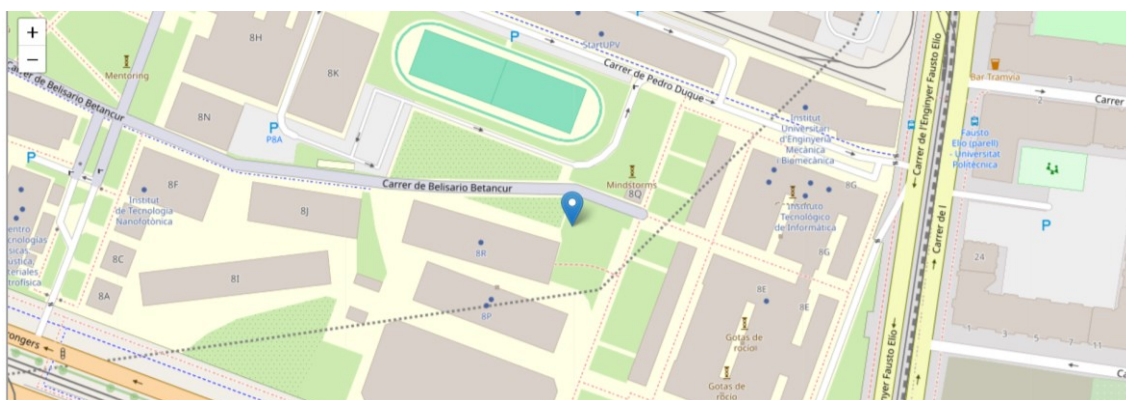


Figura 20. Marcador en mapa en ubicación exterior

De manera similar a lo anterior, en la siguiente figura se muestra el resultado de una localización en interior, siendo el marcador de color rojo y el cuadro de información indicando la planta en la que se encuentra el dispositivo.

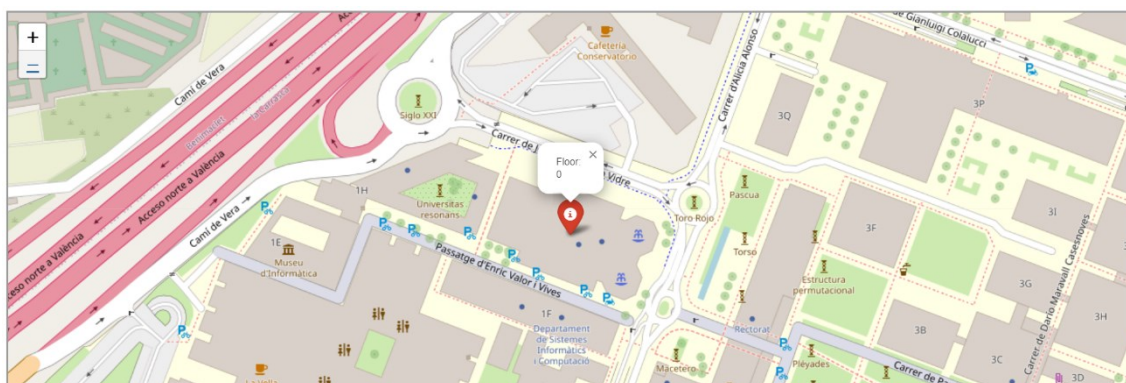


Figura 21. Marcador en mapa en ubicación interior

Como parte de las pruebas realizadas al sistema, se tomaron muestras en cada ubicación y se midió la precisión de la clasificación de cada una de ellas variando adicionalmente la cantidad de mensajes considerados por el algoritmo de localización. El algoritmo utilizado es la variante que no toma en consideración el historial de canales utilizados.

Los resultados indican que hay ubicaciones que son en general clasificadas correctamente la mayoría de las ocasiones sin importar la cantidad de mensajes utilizados. Lo anterior no aplica para la totalidad de las ubicaciones, puesto que hay algunas que claramente se ven beneficiadas al aumentar la cantidad de mensajes utilizados. De manera opuesta, existen algunas que no mejoran de forma tan clara al variar la cantidad de mensajes.

Todo lo comentado anteriormente respecto a dichos resultados se puede observar en la siguiente figura que muestra el porcentaje de precisión del sistema por ubicaciones y por cantidad de mensajes utilizados.

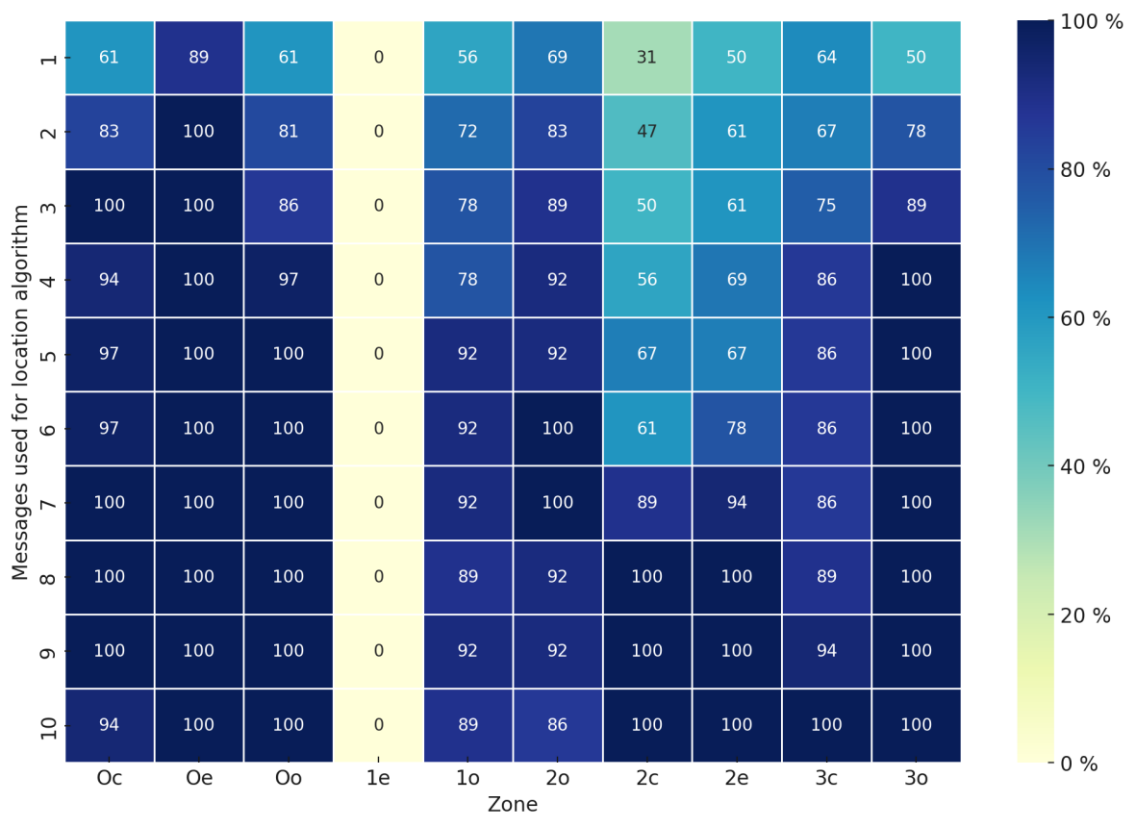


Figura 22. Precisión del sistema por zonas y por cantidad de mensajes considerados (Precisión total)

Aunque es algo intuitivo, las pruebas confirman que en promedio a mayor cantidad de mensajes utilizados mayor es la precisión de la localización, hechos que se observan claramente en la siguiente figura. Dado este hecho, se podría asumir directamente que lo mejor entonces es utilizar siempre la mayor cantidad de mensajes posibles, sin

embargo, esto tiene un impacto en la velocidad de respuesta del sistema a los cambios.

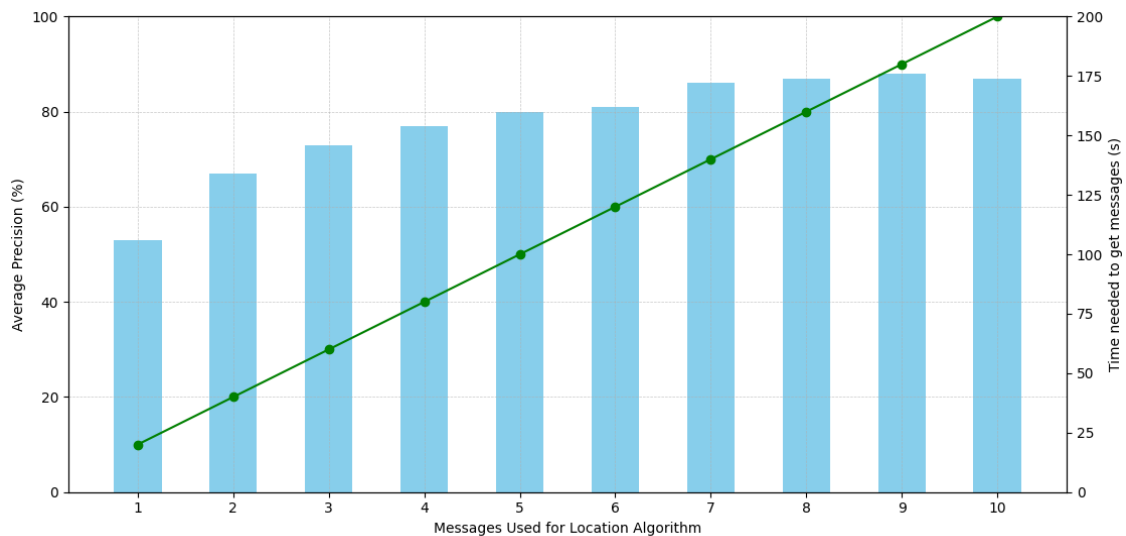


Figura 23. Precisión promedio del sistema

Esto último también puede verse en la figura anterior, en la que se muestra una línea verde que representa el tiempo que podría tomarle al sistema realizar una localización correctamente, se puede ver que va creciendo linealmente conforme aumenta la cantidad de mensajes, un comportamiento que no se repite en el incremento de la precisión del sistema.

Durante las pruebas se pudo notar, y confirmar mediante mediciones, que la precisión del sistema para clasificar correctamente sólo la zona de la ubicación es muy superior a la precisión total. Esto como tal no es inesperado puesto que de esta manera se podría considerar que el sistema solo tendría tres posibles ubicaciones (O, C y E). La figura siguiente muestra las mediciones que confirman lo anterior, destacando como caso puntual a la ubicación 1e, misma que tuvo una tasa de precisión del 0% cuando se considera la ubicación completa.

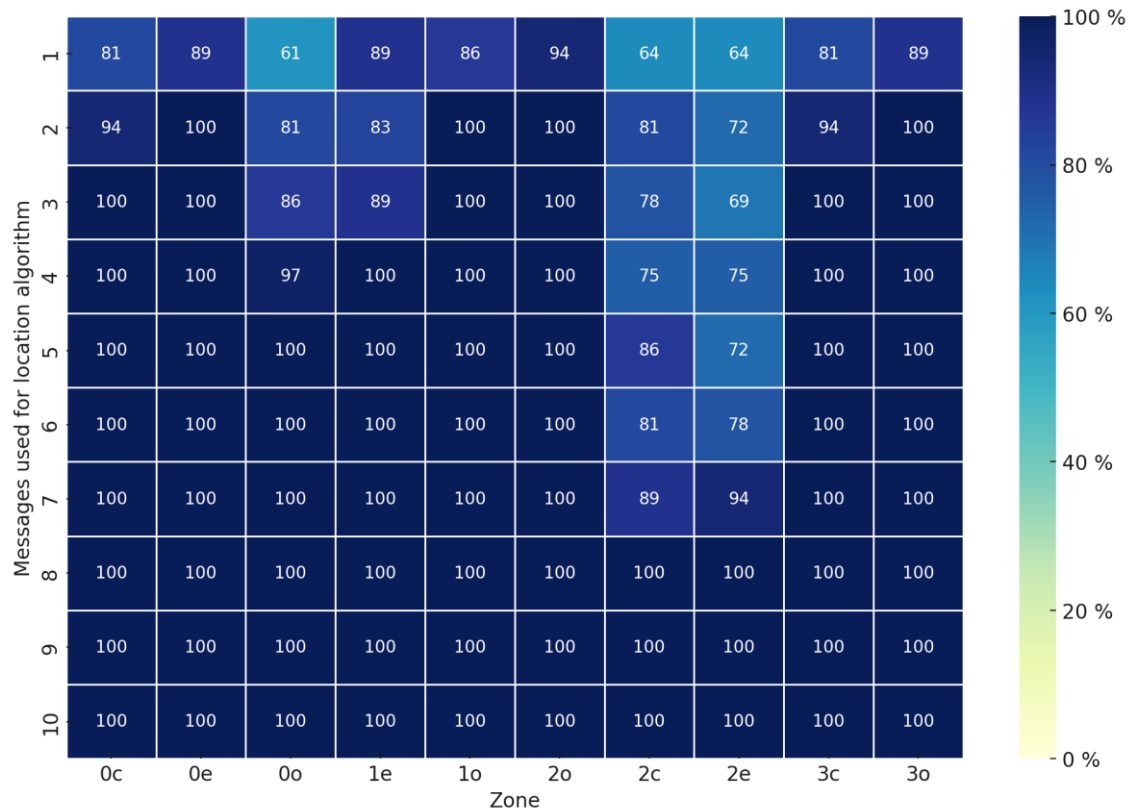


Figura 24. Precisión del sistema por zonas y por cantidad de mensajes considerados (Precisión de zona)

Con el fin de ilustrar de mejor manera el comportamiento de la precisión total respecto a la precisión de zona, se creó una gráfica con ambos valores, misma que se puede observar en la siguiente figura.

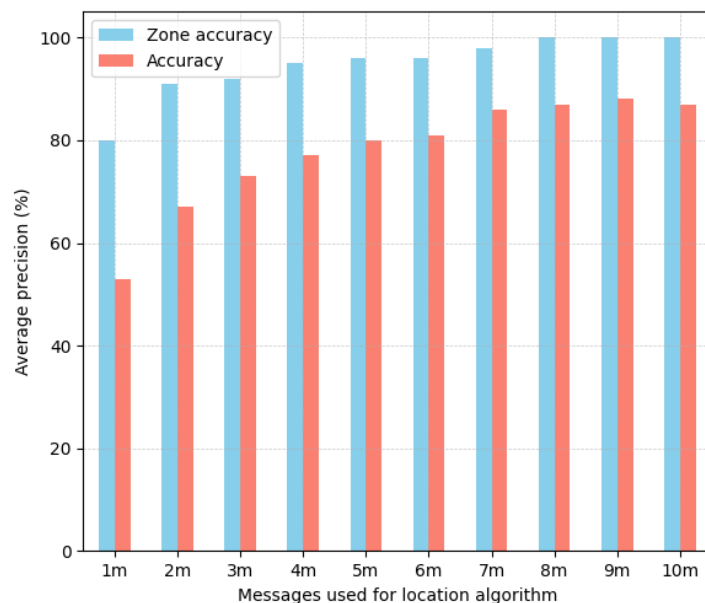


Figura 25. Comparativa de precisión total y de zona del sistema

Aunque se observa que la tendencia respecto a la mejora de la precisión por número de mensajes se mantiene, es cierto que el porcentaje de presión de zona es mucho mayor, manteniendo una diferencia en todo momento de más de 10% respecto a la precisión total.

Estos resultados permiten observar que es posible realmente que el sistema tenga una precisión del 100% si se dan las condiciones apropiadas como un número reducido de ubicaciones.

Adicionalmente, se realizaron una serie de comparativas utilizando ambas variantes del algoritmo, es decir, la que considera el historial de canales utilizados y la que no. El comportamiento observado durante las pruebas es ilustrado en la siguiente figura.

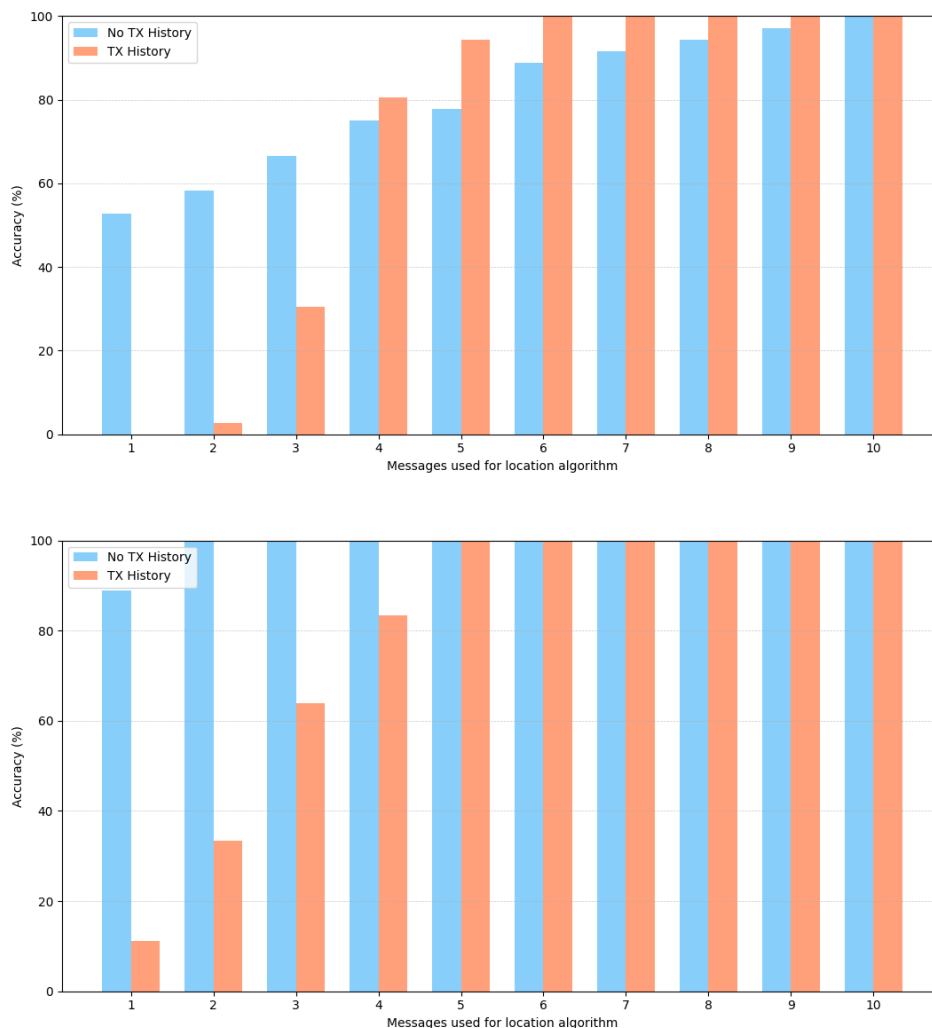


Figura 26. Comparativa de algoritmos en distintas ubicaciones. Arriba 0C, abajo 0E.

Se observa que, cuando se considera el historial de canales, la precisión del sistema es muy baja cuando se consideran pocos mensajes, sin embargo, empieza a aumentar de manera notoria al incrementar la cantidad de mensajes considerados. Al comparar

ambos algoritmos, se aprecia que el que no considera el historial de canales tiene un comportamiento más uniforme y no muestra cambios tan drásticos al variar la cantidad de mensajes, por otro lado, el que sí considera el historial, tiene cambios muy drásticos respecto al aumento de su precisión.

Como un resultado adicional se muestra en la siguiente figura el efecto del valor RSS_NULL sobre la precisión del sistema. Este valor, durante el proceso de diseño, no fue ideado para que tuviera una relevancia demasiado elevada, y de manera intuitiva se había supuesto que el valor ideal sería un valor que fuera menor al valor de la sensibilidad del receptor. Sin embargo, el experimento mostró resultados diferentes.

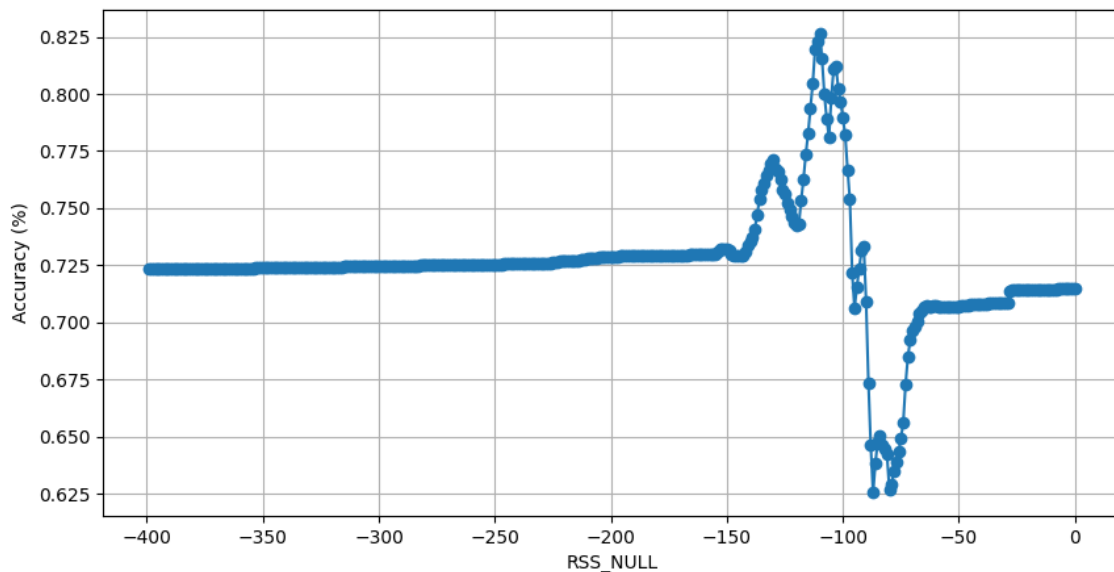


Figura 27. Precisión del sistema con distintos valores de RSS_NULL

La figura mostrada previamente fue obtenida mediante la generación de 60 conjuntos de pruebas distintos mediante las funciones proporcionadas por la herramienta benchmark, mismos que fueron ejecutados cada uno 400 veces con un valor de RSS_NULL distinto.

Se puede observar que en la mayoría de los valores utilizados la variación fue casi inexistente, inclusive pudiera llevar a pensar que el valor de esta constante no es relevante, sin embargo, se puede observar que en el rango de valores de -150 a -75 se tienen variaciones muy elevadas. Esto se le puede atribuir a que estos son los valores típicos de RSS con los que se reciben los mensajes del dispositivo final.

El experimento fue repetido en varias ocasiones, pero el resultado en general fue consistente, de esta forma fue determinado que el valor óptimo de RSS_NULL

6 CONCLUSIONES

La tecnología LoRaWAN, aplicada en el contexto de la localización y rastreo de dispositivos móviles, ha demostrado un potencial que no puede ignorarse, pudiendo ser una alternativa que permita transformar aplicaciones de monitoreo en tiempo real y gestión de activos.

A lo largo de este trabajo de fin de máster, se ha llevado a cabo una investigación de distintas fuentes y medios, misma que ha permitido llevar a la implementación diversas técnicas e integrarlas al sistema. Ejemplo de las tecnologías mencionadas son, perfilamiento RSS, perfilamiento, triangulación, etc.

Los algoritmos y herramientas desarrolladas para procesar y filtrar las señales han permitido obtener datos de localización más precisos y confiables. Lo anterior sin dejar de lado el aspecto de hardware en el cual se prioriza su funcionalidad y, en este caso, el bajo consumo energético.

Los resultados obtenidos en este proyecto confirman que el sistema puede localizar dispositivos de manera efectiva en una gran variedad de ambientes y entornos, todo tomando en cuenta las interferencias ambientales como la luz encendida y demás variedades de entornos.

En conclusión, el uso de LoRaWAN en la localización y seguimiento de dispositivos móviles representa una solución viable y eficaz, que puede ser adecuada para aplicarse a otras áreas como la logística, la seguridad pública y la gestión de infraestructuras. Ha demostrado ser particularmente efectiva, con presiones elevadas, en determinados contextos, proporcionando resultados precisos incluso en condiciones no ideales.

6.1 Trabajo futuro

Durante la elaboración y desarrollo de este trabajo de fin de máster se fueron presentando diversas líneas de investigación y alternativas que no fueron exploradas en profundidad debido a que quedaban fuera del alcance de este trabajo. Dichos aspectos presentan una oportunidad para futuras investigaciones para expandir y profundizar los conocimientos utilizados para el desarrollo de este trabajo.

A continuación, se mencionan algunas ideas y propuestas de trabajo futuro que podrían ser consideradas:

- ▶ Uso de otros y más dispositivos finales: Para comprobar la efectividad del sistema y su adaptabilidad, sería de gran utilidad realizar pruebas con una variedad de dispositivos finales. Además, esto permitiría comprar resultados y analizar diferencias en la precisión, autonomía, etc.
- ▶ Pruebas con mayor cantidad de gateways: Incrementar el número de gateways alcanzables por el sistema (en ambientes interiores), puede proporcionar información sobre el nivel de influencia de estos con la precisión del sistema. De forma intuitiva se podría suponer que un incremento en esta cantidad tendría un impacto significativamente positivo en el rendimiento del sistema y posiblemente en mejoras en la velocidad de respuesta.
- ▶ Experimentación en distintos entornos interiores: Aunque en primera instancia el sistema está diseñado para funcionar independientemente del lugar en el que se

encuentre, es necesario realizar pruebas en otros ambientes interiores para comprobar que el sistema puede ser adaptado apropiadamente.

- ▶ Evaluación del algoritmo que considera los canales de transmisión: Realizar pruebas adicionales con la versión del algoritmo de localización que considera los canales usados en transmisiones anteriores sería algo necesario para confirmar si esta versión realmente puede tener un impacto positivo en el funcionamiento del sistema o no.
- ▶ Experimentación con algoritmos de filtrado: Mejorar la implementación y realizar más pruebas del uso de algoritmos de filtrado como el filtro Gaussiano y el filtro de Kalman pudieran aportar mucho al sistema. Se podría esperar que una correcta implementación de estos en la creación de los mapas RSS pudiera tener un efecto positivo en la precisión del sistema.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Baltuille, «LoRaWAN y su aportación a las tecnologías IIoT». Accedido: 10 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.incibe.es/incibe-cert/blog/lorawan-y-su-aportacion-las-tecnologias-iiot>
- [2] M. Bor, J. Vidler, y U. Roedig, «Lora for the internet of things», en *International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*, 2016.
- [3] A. K. Paul y T. Sato, «Localization in wireless sensor networks: A survey on algorithms, measurement techniques, applications and challenges», *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 6, n.º 4, 2017, doi: 10.3390/jsan6040024.
- [4] R. Henriksson, «Indoor positioning in LoRaWAN networks», *Diplomski rad*, 2016.
- [5] G. Y. Ha, S. B. Seo, H. S. Oh, y W. S. Jeon, «LoRa ToA-Based Localization Using Fingerprint Method», en *ICTC 2019 - 10th International Conference on ICT Convergence: ICT Convergence Leading the Autonomous Future*, 2019. doi: 10.1109/ICTC46691.2019.8939702.
- [6] E. H. Yoshitome, J. V. R. da Cruz, M. E. P. Monteiro, y J. L. Rebelatto, «LoRa-aided outdoor localization system: RSSI or TDoA?», *Internet Technology Letters*, vol. 5, n.º 2, 2022, doi: 10.1002/itl2.319.
- [7] F. Zafari, A. Gkelias, y K. K. Leung, «A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies», *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 21, n.º 3, 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2911558.
- [8] L. Bornholdt, S. Kaven, y V. Skwarek, «Adaptive procedure for indoor localization using LoRa devices», en *2021 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, IPIN 2021*, 2021. doi: 10.1109/IPIN51156.2021.9662624.
- [9] H. Chen *et al.*, «Research on indoor positioning method based on LoRa-improved fingerprint localization algorithm», *Sci Rep*, vol. 13, n.º 1, p. 13981, 2023.
- [10] A. MacKey y P. Spachos, «Energy Consumption and Proximity Accuracy of BLE Beacons for Internet of Things Applications», en *2018 Global Information Infrastructure and Networking Symposium, GIIS 2018*, 2018. doi: 10.1109/GIIS.2018.8635746.
- [11] Z. Kaibi, Z. Yangchuan, y W. Subo, «Research of RSSI indoor ranging algorithm based on Gaussian - Kalman linear filtering», en *Proceedings of 2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference, IMCEC 2016*, 2017. doi: 10.1109/IMCEC.2016.7867493.
- [12] A. MacKey y P. Spachos, «Performance evaluation of beacons for indoor localization in smart buildings», en *2017 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing, GlobalSIP 2017 - Proceedings*, 2018. doi: 10.1109/GlobalSIP.2017.8309075.

8 ANEXOS

8.1 Código del dispositivo final

En esta sección se incluye una descripción del código desarrollado para el dispositivo final utilizado, que en el caso de esta implementación fue un LilyGO T-Impulse. El código permite que el dispositivo se conecte a la red The Things Network (TTN) y que de manera constante reporte información de sus sensores.

El código fuente completo y detallado se encuentra disponible en el repositorio de GitHub en la URL: <https://github.com/casillas-m/T-Impulse-TFM>. En este repositorio se encuentra información detallada sobre los archivos de código del proyecto, así como instrucciones específicas para poder configurarlo e implementarlo. El código se encuentra comentado con el fin de procurar y facilitar su comprensión.

Los archivos principales del repositorio son:

- ▶ `Bat.cpp`: Gestiona la funcionalidad relacionada a la monitorización de la batería, incluyendo inicialización de módulo ADC, entrada en modo de bajo consumo del módulo de medición y el proceso de medición de voltaje de la batería.
- ▶ `energy_mgmt.cpp`: Administra las secuencias de inicializaciones del dispositivo y secuencias de cambio a modo de bajo consumo.
- ▶ `gps.cpp`: Maneja la funcionalidad del GPS, desde su inicialización hasta el procesamiento de datos y la reducción del consumo de energía.
- ▶ `loramac.cpp`: Es el fichero más importante de este repositorio, se encarga de la comunicación LoRaWAN, configurando la conexión y acceso al medio, y manejando la transmisión de datos. En este mismo archivo se maneja la recepción de mensajes y los datos que se mandan a pantalla.
- ▶ `main.cpp`: Archivo principal que prepara la configuración del sistema y ejecuta las funciones principales.
- ▶ `oled.cpp`: Controla la pantalla OLED, incluyendo su inicialización y paso a bajo consumo.
- ▶ `touch.cpp`: Detecta entradas táctiles y mide la duración de estas en milisegundos.

Para implementar y configurar el proyecto, es necesario instalar PlatformIO y clonar el repositorio del proyecto. Dentro del directorio del proyecto, se debe configurar un archivo para definir las credenciales de LoRaWAN, este paso es detallado en el repositorio. El archivo `platformio.ini` contiene todas las configuraciones necesarias para compilar y subir el programa al dispositivo final.

8.2 Código de ficheros de procesamiento y herramientas

En esta sección se proporciona una visión general de los módulos desarrollados para el procesamiento de datos y herramientas que están asociadas al proceso de localización. Todo lo anterior permitiendo una mejor interacción con la red TTN, la recuperación de mensajes, representación gráfica de datos, simulaciones y pruebas de rendimiento.

El código fuente completo y detallado se encuentra disponible en el repositorio de GitHub en la URL: <https://github.com/casillas-m/TTN-Localization-Tools-TFM>. Dentro del repositorio se detalla con mayor amplitud la estructura de los módulos, detalles de configuración, ejecución y, adicionalmente, se proporciona el código comentado para facilitar su uso.

Los módulos desarrollados son los siguientes:

- ▶ `battery.py`: Incluye funciones para graficar el voltaje de la batería y recuperar datos históricos de voltaje.
- ▶ `map.py`: Facilita la generación de mapas RSS utilizando mensajes obtenidos de TTN, está diseñado para mostrar los resultados del mapa en pantalla de tal manera que el usuario pueda copiarlos y guardarlos en un fichero aparte.
- ▶ `benchmark.py`: Herramienta que proporciona apoyo para la generación y ejecución de pruebas de precisión de la localización, dependiendo de un mapa previamente generado. Muestra los resultados de manera gráfica.
- ▶ `locate.py`: Contiene las funciones que realizan los cálculos de la localización del dispositivo final. Proporciona distintas alternativas de localización y permite proporcionar un funcionamiento continuo para localizar activamente el dispositivo.
- ▶ `time_mapping.py`: Herramienta auxiliar utilizada por la mayoría de los módulos, proporciona las funciones necesarias para especificar rangos de tiempo y mediante estos determinar o filtrar mensajes de la red.
- ▶ `ttn_data.py`: Herramienta auxiliar, gestiona la obtención y procesamiento de datos desde TTN, incluyendo funciones para recuperar y transformar los datos en formato JSON.
- ▶ `web_app.py`: Aplicación web con el objetivo de permitir visualizar datos de localización en un mapa, mismo en el que de manera adicional se permite conocer el estado de encendido o apagado del GPS del dispositivo final.

Los detalles de cómo ejecutar estos módulos se encuentran en el repositorio, pero de manera breve se pueden resumir en:

- ▶ Copiar el proyecto
- ▶ Instalar Python
- ▶ Instalar requerimientos
- ▶ Configurar credenciales de acceso

9 GLOSARIO

AoA (Angle of Arrival): Método que determina el ángulo de llegada de una señal usando un arreglo de antenas en el receptor.

Banda ISM (Industrial, Scientific and Medical): Frecuencias reservadas internacionalmente para el uso de dispositivos de radiofrecuencia para aplicaciones industriales, científicas y médicas, que no requieren licencia para su operación.

Calibración: Proceso de ajustar y establecer los parámetros necesarios en un sistema de localización para reflejar las condiciones del entorno y obtener mediciones precisas.

Centroide geométrico: Punto que representa el centro promedio de un conjunto de puntos en un espacio geométrico. En el contexto de localización, se utiliza para determinar la posición estimada de un objeto a partir de las coordenadas de varios puntos de medición, calculando el promedio de sus coordenadas.

Chirp Spread Spectrum (CSS): Técnica de modulación que varía la frecuencia de la señal transmitida para proporcionar robustez al ruido y a la interferencia, utilizada en la tecnología LoRa.

Filtro de Kalman: Algoritmo que optimiza la precisión de las mediciones en sistemas con ruido, combinando información de diversas fuentes de manera iterativa. Utilizado para realizar predicciones a partir de mediciones inciertas o incompletas.

Filtro Gaussiano: Método que utiliza una función para reducir el ruido y detalles de señales. Pondera los valores centrales más que los periféricos, preservando las características más generales.

Gateway LoRaWAN: Dispositivo que conecta nodos LoRa a una red central o al internet, retransmitiendo los mensajes entre los nodos y el servidor de red.

Interferencia: Ruido o perturbaciones que afectan la señal de comunicación, causando errores en la estimación de distancia o localización.

Lateración: Proceso para determinar la posición de un nodo utilizando la diferencia de tiempo o distancia desde varios puntos conocidos.

LoRa: Tecnología de modulación de espectro ensanchado basada en la modulación Chirp Spread Spectrum (CSS), utilizada en comunicaciones inalámbricas de área amplia y bajo consumo, operativa en las bandas ISM.

LoRaWAN: Protocolo de red para comunicaciones de largo alcance y bajo consumo energético, ideal para dispositivos IoT, que transmite datos en las bandas sub-GHz.

Mapeo de señal: Creación de un mapa detallado de intensidades de señal en diferentes puntos de un área, utilizado en técnicas de fingerprinting o perfilamiento para localización.

Máquinas de Soporte Vectorial (SVM): Modelo de aprendizaje supervisado que analiza datos, puede ser utilizado para clasificación, regresión o detección de outliers.

Mínimos Cuadrados: Método matemático que ajusta una línea o curva a un conjunto de puntos de datos minimizando la suma de los cuadrados de las diferencias entre los puntos observados y los predichos por el modelo.

Modulación: Proceso de variar una onda portadora de señal en función de la información o datos que se desean transmitir.

Multipath: Fenómeno donde la señal de radio se refleja en múltiples superficies antes de llegar al receptor, lo cual puede provocar que llegue al receptor por múltiples caminos.

Nodo: Dispositivo o punto de red que puede enviar, recibir o retransmitir información.

Red de área amplia de bajo consumo (LPWAN): Tipo de red inalámbrica diseñada para permitir comunicaciones a larga distancia utilizando pequeñas cantidades de energía, ideal para dispositivos IoT que no transmiten grandes volúmenes de datos.

RSS (Received Signal Strength): Indicador de la intensidad de la señal recibida, utilizado para aproximar la distancia entre el dispositivo transmisor y el receptor o para realizar localización basada en la intensidad de señal.

RSS_NULL: Valor utilizado para referirse al valor de RSS utilizado en caso de ausencia de medición.

TDoA (Time Difference of Arrival): Técnica que localiza la fuente de una señal mediante la diferencia de tiempo de llegada a varios receptores.

ToA (Time of Arrival): Método que calcula la distancia entre el transmisor y receptor basándose en el tiempo que tarda un mensaje en viajar entre ambos.