

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Diseño de una Red para geoposicionamiento basada en LoRaWAN

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Telemática

Presentado por:

Jiawey David Yi Loor

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

JIAWEY DAVID YI LOOR

Este trabajo esta dedicado a mis padres por todo su apoyo incondicional, su paciencia y aliento a lo largo de mi carrera universitaria, a mi prometida Keyla por ser parte del proceso y de este logro, siempre presente en todo momento, a mi querida ESPOL y en especial a mi facultad FIEC por haberme formado a lo largo de estos años y a mis profesores por todas sus enseñanzas.

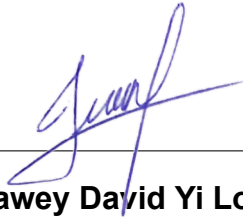
AGRADECIMIENTOS

JIAWEY DAVID YI LOOR

Agradezco a Dios por bendecirme con la culminación de mi carrera, a mis padres por darme todos los recursos posibles para alcanzar esta meta, a mi prometida Keyla por sus palabras acertadas, sus oraciones en semanas de exámenes y su lealtad en todo momento. A todos mis profesores, en especial a la PhD. Rebeca Estrada por sus sugerencias al realizar ese trabajo.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponden conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Jiawey David Yi Loor doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Jiawey David Yi Loor

EVALUADORES

Washington Velásquez, PhD.

PROFESOR DE LA MATERIA

Albert Espinal, PhD.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

En la actualidad la demanda de sistemas de geoposicionamiento es cada vez mayor, GPS cubre esta necesidad pero con el inconveniente del consumo energético, lo que limita sus aplicaciones, en este trabajo se diseña una red que utiliza la tecnología LoRaWAN mediante herramientas de simulación de código abierto para aplicar métodos de geoposicionamiento a la misma, obteniendo una alternativa eficiente energéticamente.

Se realizó la simulación de una red LoRaWAN para calcular la posición de un nodo móvil usando el modelo de simulación FLoRa dentro de OMNeT++, para calcular la posición del nodo se usó el método de trilateración, y la distancia de los gateways LoRa hacia el nodo se estimó mediante el uso del RSSI, para esto se varió la distancia en pasos de 10 metros, y se obtuvo una relación entre el RSSI y la distancia.

Se encontró que usando LoRaWAN se consumió hasta 7 veces menos potencia que GPS para ubicar a un nodo móvil, y que el error promedio en el cálculo de la posición fue de 18.81 metros.

Se concluye que LoRaWAN es una alternativa viable a GPS, ya que ofrece comunicación a largas distancias, con un bajo consumo de energía, y la precisión del cálculo de la posición se sitúa en el mismo orden de magnitud que GPS en exteriores.

Palabras Clave: LoRaWAN, GPS, Geolocalización, Ahorro de energía

ABSTRACT

Currently the demand for geopositioning systems is increasing, GPS covers this need but with the drawback of energy consumption which limits its applications, in this work a network that uses LoRaWAN technology is designed through open source simulation tools to apply geopositioning methods to it, obtaining an energy efficient alternative.

The simulation of a LoRaWAN network was performed to calculate the position of a mobile node using the FLoRa simulation model within OMNeT++, to calculate the position of the node the trilateration method was used, and the distance from the LoRa gateways to the node was estimated by using the RSSI, for this the distance was varied in steps of 10 meters, and a relationship between RSSI and distance was obtained.

It was found that using LoRaWAN consumed up to 7 times less power than GPS to locate a mobile node, and that the average error in position calculation was 18.81 meters.

It is concluded that LoRaWAN is a viable alternative to GPS, since it offers long distance communication with low power consumption, and the position calculation accuracy is in the same order of magnitude as GPS outdoors.

Keywords: LoRaWAN, GPS, Geolocalitation, Energy saving

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	iii
ABREVIATURAS	vii
SIMBOLOGÍA	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE CODIGOS DE PROGRAMA	xiii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problemática	2
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivo general	4
1.4 Objetivos específicos	4
1.5 Alcance y limitaciones	4
1.6 Marco teórico	5
2 METODOLOGÍA	11
2.1 Arquitectura Tecnológica	12
2.1.1 Simulación de red LoRaWAN	13
2.1.2 Cálculo de la posición	15
2.1.3 Cálculo de precisión	16
2.2 Criterios de inclusión y exclusión	16
2.3 Métricas de evaluación de la plataforma	17
2.4 Métrica de satisfacción del usuario	18

3	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN	19
3.1	Relación distancia - RSSI	20
3.2	Simulación	22
3.3	Cálculo de la posición	23
3.4	Capacidad de la Red y Pruebas de Rendimiento	25
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	27
4.1	Métricas de evaluación de la plataforma	27
4.2	Métricas de satisfacción del usuario	32
5	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	35
5.1	Conclusiones	35
5.2	Recomendaciones	36
5.3	Líneas futuras	37
	BIBLIOGRAFÍA	39

ABREVIATURAS

GPS	Global Positioning System
WAN	Wide Area Network
LoRa	Long Range
FLoRa	Framework for LoRa
ToA	Time of Arrival
TDoA	Time Difference of Arrival
RSSI	Received Signal Strength Indicator
GNSS	Global Navigation Satellite System
GLONASS	Global Navigation Satellite System
WLAN	Wireless Local Area Network
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
NB-IoT	Narrow Band Internet of Things
LTE-M	Long Term Evolution - Machine Type Communications
NB-Fi	Narrow Band Fidelity
EC-GSM-IoT	Enhanced Coverage - Global System for Mobile Internet of Things
WiFi	Wireless Fidelity, IEEE 802.11
LGPL	Lesser General Public License
IoT	Internet of Things
ADR	Adaptative Data Rate

SIMBOLOGÍA

m	Metro
km	kilometro
dB	Decibel
dBm	Decibel mili
W	Watt
mW	miliWatt

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Diagrama de la arquitectura del proyecto	12
2.2	Diseño de la red LoRaWAN dentro de OMNeT++	14
3.1	Proceso para obtener la posición del nodo	19
3.2	Obtención de la distancia usando el RSSI.	20
3.3	Gráfico de la relación entre la distancia y el RSSI, el eje X es la distancia y el eje Y es el RSSI.	21
3.4	Nodo moviéndose y enviando tramas que contienen el valor del RSSI.	22
3.5	Topología con 5 nodos móviles	25
4.1	Pregunta 1. Topología de la Red	32
4.2	Pregunta 2. Parámetros Configurables	32
4.3	Pregunta 3. Utilización de la propuesta	33
4.4	Pregunta 4. Procesamiento en Python	33

ÍNDICE DE TABLAS

2.1	Valores por defecto de los parámetros para el modelo de pérdida de potencia [1] .	16
3.1	Relación entre el RSSI y la distancia entre el gateway y el nodo.	21
4.1	Posición de los gateways, estas son fijas.	28
4.2	Datos obtenidos de los gateways en el envío de la primera trama.	28
4.3	Posición encontrada en el envío de la primera trama.	28
4.4	Datos de los gateways en el envío de la segunda trama.	28
4.5	Posición encontrada en el envío de la segunda trama	29
4.6	Datos de los gateways en el envío de la tercera trama.	29
4.7	Posición encontrada en el envío de la tercera trama.	29
4.8	Datos de los gateways en el envío de la cuarta trama.	30
4.9	Posición encontrada en el envío de la cuarta trama.	30
4.10	Promedio del error en la posición.	30
4.11	Consumo energético en un dispositivo móvil.	31

ÍNDICE DE CODIGOS DE PROGRAMA

3.1	Código de Procesamiento para trilateración	24
-----	--	----

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El geoposicionamiento tiene múltiples aplicaciones en la actualidad, tales como la producción a nivel industrial, aplicaciones logísticas, desarrollo de tecnologías y uso cotidiano de usuarios promedios. El desarrollo de aplicaciones de geoposicionamiento ha estado fuertemente ligado a GPS (Global Positioning System) [2], sin embargo existe otro conjunto de tecnologías que también sirven para este propósito.

Las tecnologías LPWAN (Low Power Wide Area Network) están diseñadas para brindar comunicación a larga distancia y con bajo uso de energía, estas pueden agruparse por tecnologías propietarias y basadas en estándares, entre las propietarias se encuentran Sigfox, NWave, Telensa, Ingenu y Qowisio, y dentro de las basadas en estándares se encuentran LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), NB-IoT (Narrow Band Internet of Things), LTE-M (Long Term Evolution - Machine Type Communications), NB-Fi (Narrow Band Fidelity), DASH7, Weightless y EC-GSM-IoT (Enhanced Coverage - Global System for Mobile Internet of Things) [3], de las cuales las más populares son Sigfox, LoRaWAN, NB-IoT [4], y DASH7 [5].

La investigación de estas tecnologías ha tenido un desarrollo acelerado en los últimos años debido a su increíble utilidad dentro de las redes IoT (Internet of Things), ya que necesitan un método de comunicación inalámbrica que pueda soportar una gran cantidad de dispositivos conectados al mismo tiempo, con comunicación a larga distancia, usando pocos recursos energéticos para que su implementación sea viable económicamente. Estas tecnologías pueden ser aplicadas en distintos campos como, seguridad, rastreo de activos, agricultura, medición inteligente, ciudades inteligentes, y hogares inteligentes [4].

El presente proyecto se enfoca en LoRaWAN para la localización en exteriores debido a las distintas aplicaciones que tiene esta tecnología como, monitoreo de animales de granja [6], cuidado de personas de edad avanzada que padezcan demencia [7],

prevención de incendios [8], entre otros, esto se debe a que LoRaWAN cuenta con características muy importantes para estas aplicaciones como una amplia cobertura y larga duración de la batería. Un gateway LoRa (Long Range) puede cubrir hasta 5 km en áreas urbanas, hasta 15 km en áreas suburbanas, y 45 km en áreas rurales, con una duración de batería de hasta 10 años [9].

Como antecedente se recopila información sobre GPS, WiFi y LoRaWAN en ámbitos de geolocalización, luego se esclarece cuales son los parámetros relevantes en el ámbito del geoposicionamiento para realizar una comparación entre las tecnologías antes mencionadas y porque se ha escogido a LoRaWAN, a continuación se revisan los métodos de obtención de posición en LoRaWAN y las recomendaciones en cuanto al número de gateways para localización en exteriores y así escoger el número correcto para el diseño de la red, luego se simula una red LoRaWAN para obtener resultados empíricos sobre la precisión de la ubicación usando RSSI (Received Signal Strength Indicator), se comparan estos resultados con otras investigaciones encontradas en la literatura y finalmente se establece la viabilidad de LoRaWAN para la geolocalización en exteriores.

1.1 Problemática

Para localizar o rastrear personas la tecnología más utilizada es GPS [2], sin embargo tiene una desventaja muy considerable la cual es su alto consumo energético [10], lo que conlleva a que dispositivos que utilicen esta tecnología deban recargar sus baterías limitando sus aplicaciones en distintos escenarios. Las baterías de litio actuales van perdiendo poco a poco su capacidad de carga entre más ciclos de carga y descarga experimenten [11], esto es un problema medioambiental, ya que las baterías que necesitan recargarse constantemente se vuelven desechos electrónicos más rápido [12], debido a esto, un protocolo de comunicación que prolongue la duración de la batería, y por lo tanto, su vida útil, es de gran beneficio para la sociedad, justamente las tecnologías LPWAN están diseñadas para un consumo relativamente bajo de energía, una de esas tecnologías es LoRaWAN, por lo tanto LoRaWAN se presenta como una alternativa para preservar el medioambiente.

1.2 Justificación

La cantidad de dispositivos conectados a internet se incrementa de manera exponencial y los requerimientos de los mismos no pueden ser cubiertos por las redes de comunicación inalámbrica convencionales, para lograr la interconexión a gran escala se requiere de un método de comunicación que funcione a grandes distancias y que pueda soportar una gran cantidad de dispositivos al mismo tiempo, esto a su vez requiere que el uso de energía de cada dispositivo disminuya, para que la red sea económica y energéticamente viable, como alternativa a estos requerimientos fueron creadas las redes LPWAN, siendo LoRaWAN una de las más populares [4].

Los dispositivos de redes LoRaWAN son utilizados comúnmente en lugares donde no existe cobertura de red tradicional por lo que su principal función es brindar comunicación entre dispositivos pero también se destaca otra utilidad de esta tecnología enfocada al geoposicionamiento mediante métodos como trilateración, de esta forma se tiene una red de bajo consumo energético con funcionalidad de geoposicionamiento [7] que cubre sectores que no tienen cobertura como GSM o GPS.

Por lo mencionado anteriormente, usar LoRaWAN como alternativa a GPS para conocer la ubicación de un objeto o persona, permite aplicar la tecnología para ayudar al ciudadano moderno, permitiendo aplicaciones como el rastreo de activos por ejemplo, aparte trae beneficios al medio ambiente y también conveniencia al usuario, ya que al requerir menos energía, la batería dura más tiempo, su vida útil aumenta y se crean menos desechos electrónicos, esto se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible de la ONU ¹, específicamente con los objetivos 7, 9, 11, 12 y 15, que corresponden a energía sostenible y no contaminante, industria, innovación e infraestructura, ciudades y comunidades sostenibles, producción y consumo responsables, y vida de ecosistemas terrestres.

¹<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

1.3 Objetivo general

Simular una red LoRaWAN usando el modelo de simulación FLoRa en OMNeT++ para el cálculo de la ubicación de un nodo móvil en exteriores.

1.4 Objetivos específicos

- Desplegar una red LoRaWAN con tres gateways y un nodo móvil con FLoRa usando el método de trilateración para el cálculo de la posición.
- Obtener una relación entre la distancia y el RSSI mediante la simulación para que pueda hallarse la solución al sistema de ecuaciones del método de trilateración.
- Calcular la posición del nodo móvil usando un programa que resuelva el sistema de ecuaciones del método de trilateración.

1.5 Alcance y limitaciones

La finalidad de este trabajo es proponer el uso de la tecnología LoRaWAN para aplicaciones de geolocalización, para esto se simulará una red LoRaWAN usando el modelo de simulación FLoRa (Framework for LoRa) en el programa OMNeT++, en la cual exista un nodo móvil al cual se le calculará la posición. Existen diferentes técnicas para el cálculo de la posición como, por ejemplo, trilateración y multilateración, sin embargo, la técnica que se usará en la simulación será la de trilateración, ya que es más simple de implementar y resolver. En términos de eficiencia energética se comparará LoRaWAN usando los resultados de la simulación con otra tecnología utilizada para la geolocalización como es GPS, los valores de energía usados por GPS se extraerán de la literatura, con la finalidad de estimar la viabilidad de LoRaWAN frente a GPS en el ámbito de consumo de energía. Se comparará también, mediante la literatura y simulación, a LoRaWAN y GPS en la precisión con la que ubican a nodos móviles.

La limitación principal es el ambiente de simulación, ya que no se pueden tener en cuenta todas las variables que afectan a un sistema real, por ejemplo la pérdida de potencia es modelada mediante el método de *"log-distance path loss with shadowing"* por lo que se entiende que los resultados obtenidos son solo una estimación de la realidad.

1.6 Marco teórico

La localización en tiempo real tiene varias aplicaciones en la vida de un ciudadano común de la sociedad moderna, facilita tareas cotidianas como encontrar taxi, mostrar la ruta más adecuada para conducir, andar a pie o en transporte público, facilita también labores de rescate [13]. Todo esto se da gracias al sistema de posicionamiento global GPS; como aclaración, el término general para estos sistemas es "Sistema Global de Navegación por Satélite" o GNSS por sus siglas en inglés, GPS es solo el sistema manejado por Estados Unidos ², la Unión Europea tiene su propio sistema llamado "Galileo" ³, y la Federación Rusa tiene a GLONASS ⁴.

GPS podría parecer la solución para obtener la ubicación de dispositivos móviles en tiempo real en exteriores, pero a pesar de los esfuerzos realizados a través de los años, sigue siendo un sistema que agota relativamente rápido la batería, si se lo usa de manera continua puede agotar la batería de un móvil en 6 horas [10], esto no es conveniente para el usuario, ya que se debe preocupar constantemente de la carga de su dispositivo, y en ciertas situaciones la baja duración de la batería puede ser un factor limitante, como en operaciones de rescate, y aún más si se usan drones [14].

Debido a que los dispositivos móviles usan baterías de litio, el hecho de que GPS agote rápidamente su carga también es un problema para el medio ambiente, ya que, la vida útil de estas baterías se ve afectada por los ciclos de carga y descarga, entre más se descargue la batería, y con más frecuencia, menor es su vida útil [11], convirtiéndose en basura electrónica más rápidamente, además las baterías usadas contienen elementos tóxicos para el ambiente [12].

Las redes WLAN también pueden usarse para localización, pero en interiores o en áreas no tan extensas [15, 16], esto es debido a su diseño, la letra L en WLAN es por *Local*, es decir, está pensado para áreas pequeñas, por lo que en general se usa en conjunto con GPS para obtener la ubicación tanto en interiores como en exteriores, ahorrando batería al no usar GPS todo el tiempo [10].

En este proyecto el enfoque es en localización en exteriores, debido a que la plataforma de simulación, que se explicará más adelante, no posee las herramientas para

²<https://www.gps.gov/systems/gps/spanish.php>

³<https://www.gsc-europa.eu/galileo/what-is-galileo>

⁴https://glonass-iac.ru/spa/about_glonass/

simular la física que implica la comunicación inalámbrica en ambientes reales, como por ejemplo, la reflexión y propagación de las ondas en las paredes, no se considera a WLAN como posible solución, ya que su utilidad es en interiores. Entonces, lo que se busca es un protocolo que tenga la funcionalidad de GPS pero sin tal demanda de energía.

Para el caso de comunicación a larga distancia usando poca energía se ha creado LPWAN, esta tecnología tiene diversas aplicaciones como, el monitoreo de botes en el mar [17], monitoreo de la salud de mineros [18], monitoreo del uso de energía eléctrica en redes IoT [19], y en operaciones de rescate en terrenos montañosos [20]. Dentro de LPWAN existen diferentes alternativas, entre las más populares se encuentran Sigfox, NB-IoT y LoRaWAN [4, 5], aquí el enfoque es en LoRaWAN debido a la disponibilidad de una suite de simulación en la que se puede realizar el proyecto.

Inicialmente la creación de LPWAN se dio por los requerimientos de las redes IoT de ser capaces de comunicación a larga distancia, consumir poca energía, baja velocidad de transmisión de datos y de ser económicas, ya que las soluciones existentes no cumplían con estos requisitos, por ejemplo, Bluetooth no sirve para comunicación a larga distancia, y las redes celulares aunque sí cumplen con este requisito en cambio consumen mucha energía [4].

La tecnología LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) es una tecnología inalámbrica que permite la comunicación a larga distancia entre dispositivos y una red de gateways. Esta tecnología se utiliza principalmente para aplicaciones de Internet de las cosas (IoT) y para la monitorización de sensores y dispositivos remotos. Una de las principales ventajas de LoRaWAN es su capacidad para cubrir grandes áreas con una sola gateway [21], lo que lo convierte en una tecnología ideal para la geolocalización de dispositivos.

La geolocalización LoRaWAN tiene una gran variedad de aplicaciones en el mundo de IoT. Una de las más populares es la localización de dispositivos móviles, como teléfonos y vehículos. Esto permite a las empresas y a las autoridades públicas rastrear y monitorear los movimientos de estos dispositivos, lo que es especialmente útil en caso de emergencia o para la gestión de flotas de vehículos.

Otra aplicación común de la geolocalización LoRaWAN es la monitorización de activos. Esto incluye la localización de contenedores, camiones, maquinaria y otros activos valiosos. Esto permite a las empresas optimizar su logística y reducir los costos

de seguridad.

La geolocalización en LoRaWAN se basa en la medición de la potencia de señal recibida por los dispositivos a través de varios gateways. Esta medición se utiliza para calcular la distancia entre el dispositivo y cada gateway, lo que permite determinar la posición del dispositivo. La precisión del proceso de geolocalización en LoRaWAN depende del método que se use, unos son más precisos que otros dependiendo de las condiciones del espacio donde se despliegue la red [9].

La precisión de la geolocalización LoRaWAN varía dependiendo de varios factores, como la densidad de gateways en la zona, el número de dispositivos conectados a la red y las condiciones ambientales. Sin embargo, en general, la precisión de la geolocalización LoRaWAN es muy alta y puede llegar a ser de pocos metros [22, 23].

Para todos los métodos se requieren mínimo de 3 antenas para localizar a un objetivo, en teoría con 3 es suficiente, sin embargo, dependiendo de la geometría del lugar donde se encuentre la red y debido a la cantidad de señales inalámbricas que se encuentran en la misma banda de frecuencias, en la práctica es necesario contar con más antenas, entre más antenas se tenga, mejor es la precisión de la ubicación, sin embargo, esto también implica que el cálculo se vuelve más complejo, requiriendo más procesamiento.

Hay varios métodos de geolocalización en LoRaWAN, pero los más comunes son el método de trilateración y el método de multilateración [24], el primero se basa en la potencia recibida y el segundo en la diferencia del tiempo de llegada de la señal. El método de trilateración utiliza la medición de la potencia de señal recibida por tres gateways para calcular la posición del dispositivo. El método de multilateración en cambio utiliza la diferencia en el tiempo de llegada de la señal del nodo a los tres gateways.

El método de multilateración es el más preciso que el de trilateración [7]. Sin embargo, implica cálculos más complejos y por lo tanto un mayor poder de procesamiento, lo que puede ser un problema para dispositivos con baja potencia de procesamiento.

El método de trilateración es menos preciso que el método de multilateración, pero es más fácil de implementar y requiere menos cálculos. Este método utiliza la medición de la potencia de señal recibida por 3 gateways para calcular la posición del dispositivo, por lo que el objetivo debe encontrarse en el área de cobertura. Debido a la gran cobertura que ofrece LoRaWAN esto no es problema, llegando a cubrir hasta 10 km en áreas rurales sin obstáculos [25, 26].

Los métodos de multilateración, utilizan el tiempo que le toma a la señal llegar del objetivo hacia los gateways, aprovechando la propiedad de que las ondas electromagnéticas se propagan a la velocidad de la luz, para así calcular la distancia que existe entre los gateways y el objetivo.

Dos de estos métodos son ToA (Time of Arrival) y TDoA (Time Difference of Arrival), como usan el tiempo como guía para calcular la distancia, es necesario que exista una sincronización entre los gateways para que todos tengan la misma referencia temporal [7], lo que en ciertos casos supone un problema adicional a resolver ya que no siempre se cuenta con la tecnología o los recursos necesarios para sincronizar relojes en los gateways.

Para usar el primer método, ToA, se necesita que los tres gateways usados en la trilateración y el objetivo a localizar se encuentren sincronizados mediante reloj, para que el cálculo de la distancia sea coherente, ya que como su nombre lo indica, para estimar la distancia se usa el tiempo en el que la señal llega a los tres gateways, pero esta medida solo tiene sentido, si todos los elementos, gateways y nodo, tienen la misma referencia, se podría decir coloquialmente, que todos deben hablar el mismo idioma.

El segundo método, TDoA, es un poco más flexible en sus requerimientos, ya que solo se necesita que los gateways estén sincronizados por reloj, el nodo no necesita estar sincronizado, lo que facilita su implementación, sin embargo, este método difiere de los demás en su formulación matemática, los métodos anteriores, RSSI y ToA, se modelan como la resolución al problema de encontrar la intersección de tres circunferencias, en el caso bidimensional, en cambio, TDoA se modela como el problema de encontrar la intersección de tres hipérbolas, para lo cual se necesitan 4 gateways [7]. Esto requiere de un mayor procesamiento, lo que significa que no es una solución viable en todos los casos.

Por lo antes expuesto, en este proyecto se usa el método de trilateración usando la potencia de la señal recibida por los gateways para calcular la posición de un nodo móvil, ya que este método es simple de implementar y sirve para probar la precisión y el uso de energía en la localización con LoRaWAN.

Para poder usar este método primero se debe establecer una relación entre la potencia de la señal recibida, RSS (Received Signal Strength), y la distancia a la que se encuentra el nodo, por eso primero es necesario realizar pruebas donde se recopile

esta información para luego poder resolver el problema de trilateración, la intersección de tres circunferencias. En algunas investigaciones incluso se ha usado inteligencia artificial para mejorar este proceso [27, 23, 22].

En este proyecto se realiza la simulación de una red usando OMNeT++ ya que cuenta con un modelo para simular redes LoRaWAN llamado FLoRa, este modelo de código abierto fue desarrollado en 2017 para poner a prueba a LoRaWAN sin la necesidad de contar con todo el hardware requerido, se encuentra escrito en C++, y ya se han llevado a cabo varias investigaciones por parte de sus desarrolladores ⁵.

En el primer artículo donde mencionan el uso de FLoRa [1], investigan acerca del uso de ADR (Adaptative Date Rate) y como puede mejorar la comunicación de los nodos en una red LoRaWAN densa, es decir, con muchos nodos muy cerca, dentro de este mismo estudio describen como está diseñado FLoRa, por lo que se ha tomado de guía para comprender el modelo de simulación.

FLoRa cuenta con la implementación de las capas física y MAC de LoRa, puede realizar comunicación bidireccional, e incluso simular una red troncal que hace las veces de internet, además de simular nodos y gateways LoRa, este software permite observar la energía usada en cada nodo de la red [1].

Al contar con una implementación de la capa física se pueden modificar los parámetros de LoRa como, el factor de dispersión, la potencia de transmisión, el ancho de banda, la frecuencia central y la tasa de datos, estos factores afectan la cobertura de comunicación y que tanto ocurren colisiones. Se dice que no ocurre una colisión o que una transmisión es exitosa cuando la potencia de la señal recibida es mayor a la sensibilidad del receptor.

La potencia de la señal recibida depende de varios factores en un ambiente real, en FLoRa se toma en cuenta la potencia de transmisión, la pérdida de potencia debido a atenuaciones y el ensombrecimiento, esto se modela usando *log-distance path loss with shadowing*.

Este modelo cuenta con cuatro parámetros que son, la pérdida de potencia media hacia una cierta distancia, esa distancia, el exponente de pérdida de potencia, y una variable aleatoria normal para describir la variabilidad del entorno [1].

Este modelo le permite a FLoRa simular ambientes con condiciones urbanas y suburbanas, para los cuales se han declarado valores por defecto para los parámetros

⁵<https://flora.aalto.fi/research/>

antes mencionados, en la sección 2.1.2 se muestran estos valores en la tabla 2.1. Estos valores fueron obtenidos de investigaciones pasadas [28, 29] y se ha concluido que para áreas suburbanas la cobertura es mayor que en las áreas urbanas.

Para las colisiones se usa el modelo propuesto en [28], donde se asume que dos transmisiones que se encuentren en canales ortogonales, es decir, con factores de dispersión diferentes, no colisionan, y si dos transmisiones no se encuentran en canales ortogonales, solo colisionan si coinciden en tiempo. Si dos transmisiones colisionan, la más potente de las dos es decodificada correctamente, suponiendo que la diferencia es mayor a 6 dBm y al menos 5 símbolos del preámbulo son recibidos.

El consumo de energía de un nodo LoRa depende del estado en el que se encuentre y durante cuanto tiempo se encuentre en ese estado, existen tres estados, transmitiendo, recibiendo y durmiendo, el nodo pasa a dormir luego de transmitir o recibir, y la energía usada en la etapa de transmisión depende de la potencia de transmisión configurada.

FLoRa permite la simulación de una red LoRaWAN completa ya que cuenta con nodos LoRa, gateways, y un servidor que se conecta a través de una red troncal que simula ser internet. Los gateways son capaces de recibir tramas de nodos en diferentes canales, de acuerdo a las especificaciones de LoRaWAN, y se comunican con el servidor mediante IP, la manera de comunicar a un gateway con el servidor puede ser mediante Ethernet o WiFi, y se pueden usar enlaces Gigabit si se usa Ethernet.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

La metodología que sigue este proyecto es de tipo experimental, ya que el objetivo es simular una red LoRaWAN y calcular la posición de un nodo móvil mediante trilateración para demostrar que, LoRaWAN puede ser energéticamente más eficiente que GPS y que la ubicación obtenida es de una precisión comparable a la GPS en exteriores. Se ha escogido ambientes exteriores porque el software de simulación que se usa, no está diseñado para simular las interacciones físicas de las señales inalámbricas con el entorno, por ejemplo, propagación de la señal a través del concreto. Con la realización de este proyecto se pretende incentivar el uso de LoRaWAN como alternativa a GPS para obtener la ubicación de nodos móviles, esto porque GPS es un sistema que consume mucha energía, y esto impacta negativamente al medio ambiente. Con la simulación de una red LoRaWAN, estudiantes y profesionales de áreas relacionadas pueden probar por cuenta propia las capacidades de esta tecnología, familiarizándose con ella, lo cual facilita su adopción. Para comprobar si LoRaWAN es energéticamente más eficiente que GPS, se hace uso de los datos de consumo de energía del nodo proporcionados por FLoRa, y se comparan con el uso de energía de un nodo que usa GPS, este valor se obtiene mediante artículos académicos. Para comprobar si LoRaWAN se compara en precisión de ubicación a GPS, se recolectan los datos de potencia de la señal proporcionados por FLoRa, luego mediante un script se realiza el cálculo de la ubicación del nodo, después se comparan estos valores con los que se encuentran en la literatura sobre la precisión de GPS en exteriores.

2.1 Arquitectura Tecnológica

El software que se usa para correr la simulación es OMNeT++¹ en su versión 6.0, el cual es un programa que permite la simulación de redes de comunicación, en este caso se usa el modelo de simulación FLoRa² versión 1.1, que sirva para simular redes LoRa, permite la creación de nodos, gateways y un servidor. Para calcular la ubicación del nodo móvil se procesan los datos de potencia proporcionados por FLoRa en un script de Python³ versión 3.10. A continuación se presenta un gráfico con la arquitectura del proyecto.

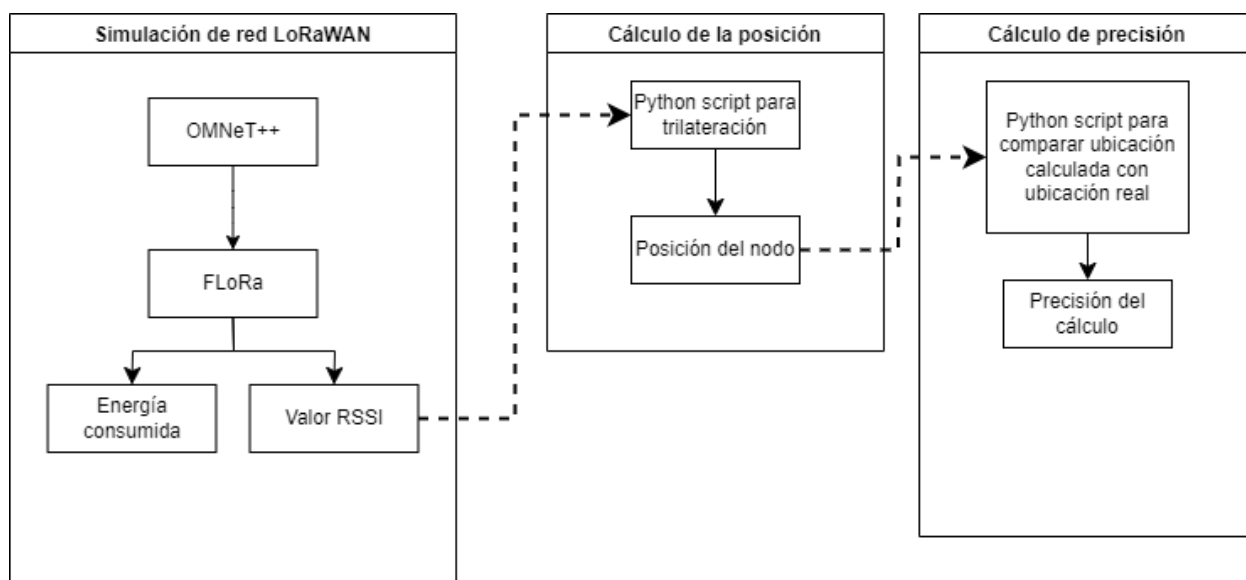


Figura 2.1: Diagrama de la arquitectura del proyecto

Como se puede apreciar, el proyecto se divide en tres etapas, primero la simulación de la red LoRaWAN donde se realizan las pruebas, le sigue la etapa de cálculo de posición del nodo, donde se calcula la posición en base a los valores de potencia obtenidos de la simulación, y por último, se calcula la precisión de la posición obtenida en la etapa anterior, con esto se puede comparar la precisión con GPS.

¹<https://omnetpp.org/>

²<https://flora.aalto.fi/>

³<https://www.python.org/>

2.1.1 Simulación de red LoRaWAN

Para la simulación de la red se usa OMNeT++ versión 6 ya que cuenta con un modelo de redes LoRaWAN instalable creado por terceros, llamado FLoRa (Framework for LoRa), este modelo de simulación es relativamente reciente, ya que fue publicado en 2017 ⁴, la elección de este modelo se debe a que se puede simular por completo una red LoRaWAN, es decir, los nodos, gateways y un servidor, permite configurar los nodos para que tengan movimiento, algo esencial para probar la precisión de la localización usando esta simulación de LoRaWAN, también se observa el consumo de energía de todos los nodos de la red, por lo que sirve para comprobar si consume menos energía que GPS, se pueden realizar simulaciones con una gran cantidad de nodos, por lo que se puede usar también para probar el rendimiento de LoRaWAN en situaciones extremas [1].

Para la simulación en este proyecto, la trayectoria de los nodos se define de manera determinista, siendo esta una circunferencia, se escoge esta trayectoria porque viene incluida por defecto en el paquete de simulación, lo que facilita la labor de programación, ya que como su nombre lo indica OMNeT++ usa el lenguaje de programación C++ ⁵.

Teniendo en cuenta que se realiza la localización por medio de trilateración, es decir, la localización solo funciona en escenarios donde el nodo tiene la cobertura de 3 antenas, el diseño de la red LoRaWAN va de la siguiente manera: 3 gateways que sirven como las 3 antenas necesarias para estimar la posición en base a la pérdida de potencia, 1 nodo móvil que se mueve en una circunferencia de radio fijo, 1 router que sirve de concentrador de los datos obtenidos por los 3 gateway antena, una red intermedia entre el concentrador y el servidor principal que actúa como internet, un router del lado del servidor que sirve para comunicar la red de internet con el servidor principal, y por último el servidor principal, se escoge esta configuración debido a que cumple con los elementos necesarios para probar la funcionalidad de los criterios teóricos ya que se quiere demostrar que es posible localizar a un nodo móvil en una red LoRaWAN, aunque el framework de Inet4.4 permite otros criterios de movilidad para dispositivos, se ha elegido una movilidad circular por la facilidad visual de percibir el movimiento del nodo y garantizar que no salga del área de cobertura de los Gateways fijos. A continuación se muestra una imagen del diseño de la red para mayor claridad.

⁴<https://github.com/florasim/flora>

⁵<https://isocpp.org/>

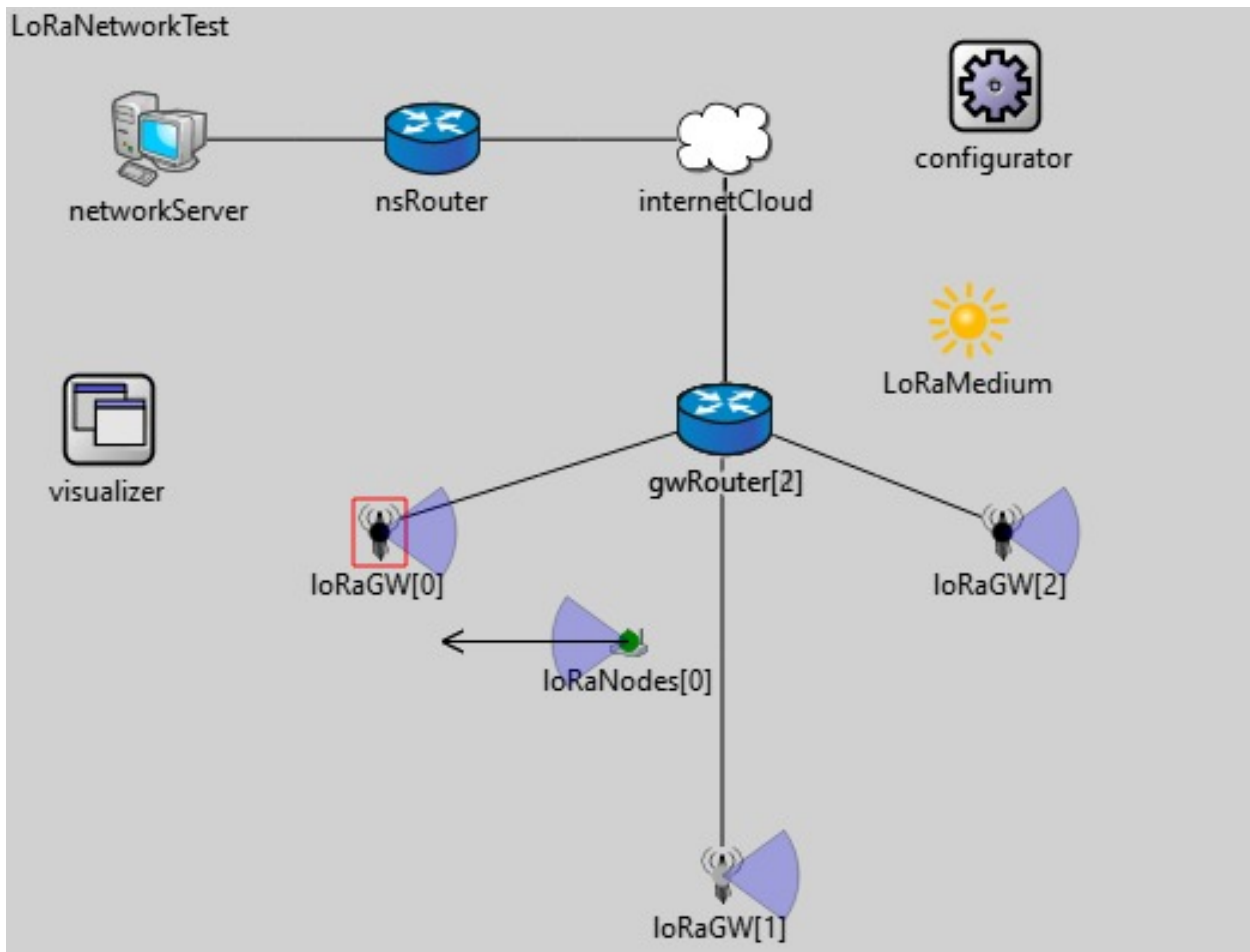


Figura 2.2: Diseño de la red LoRaWAN dentro de OMNeT++

2.1.2 Cálculo de la posición

El cálculo de la posición se hace en base a trilateración como se mencionó anteriormente, básicamente el método funciona de la siguiente manera, en dos dimensiones, cada gateway que funciona como antena genera una onda que se propaga como una circunferencia cuyo radio aumenta hasta encontrarse con el objetivo, esto define una circunferencia de cierto radio, y la solución puede ser cualquier punto de la circunferencia, por lo que se tienen infinitas soluciones, si se aumenta el número de gateways a 2, el objetivo estará en alguno de los puntos de intersección de las circunferencias, pero al aumentar a 3 gateways las 3 circunferencias se intersectan en un solo punto, hallando la posición del objetivo.

Matemáticamente esto se puede modelar como un sistema de 3 ecuaciones, donde la solución del sistema es la posición del nodo, repitiendo este proceso se puede calcular la posición del nodo en movimiento. A continuación se presenta el sistema de ecuaciones a resolver:

$$\begin{cases} (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r_0^2 \\ (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2 \end{cases} \quad (2.1)$$

El sistema de coordenadas rectangulares en dos dimensiones se representa por x e y , donde los pares (x_i, y_i) ; $i = 0, 1, 2$ representan la posición de los 3 gateways antena, y los r_i ; $i = 0, 1, 2$ representan la distancia que hay desde los gateways hacia el nodo.

Para calcular la pérdida de potencia FLoRa usa "log-distance path loss model with shadowing" [1], cuya formula es:

$$PL(d) = \overline{PL}(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (2.2)$$

Donde $\overline{PL}(d_0)$ es la pérdida de potencia media para la distancia d_0 , n es el exponente de la pérdida de potencia, y X_σ es una variable aleatoria normal con desviación estándar σ . Los valores por defecto de estos parámetros se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2.1: Valores por defecto de los parámetros para el modelo de pérdida de potencia [1]

Escenario	d_0 [m]	$\overline{PL}(d_0)$ [dB]	n	σ [dB]
Urbano	40	127.41	2.08	3.57
Suburbano	1000	128.95	2.32	7.08

FLoRa permite medir el RSSI (Received Signal Strength Indicator), y mediante la repetición de ensayos a ciertas distancias se puede usar este valor para inferir la distancia entre el gateway y el objetivo, incluso se puede ir más allá y usar redes neuronales para estimar la distancia con mayor precisión [23, 22], sin embargo, por simplicidad eso no se realiza en este proyecto.

RSSI se calcula restando la potencia de la señal transmitida con la potencia de la señal recibida, que es la que se obtiene de la ecuación 2.2.

2.1.3 Cálculo de precisión

Si otras investigaciones desean comparar LoRaWAN con sistemas y métodos de localización diferentes a trilateración es necesario que conozcan la precisión con la que se calcula la posición del nodo en movimiento, para esto se toman las posiciones calculadas en la etapa anterior y se las compara con la posiciones exactas, como la trayectoria del nodo es determinista, las posiciones exactas son los puntos de la circunferencia que traza, luego se calcula el error experimental en cada punto y se promedia. La posición se obtiene como un par de coordenadas (x, y) , por lo que para calcular la diferencia entre la posición calculada y la posición real simplemente se usa la formula para hallar la distancia entre dos puntos, que se muestra a continuación. Notando que (x_c, y_c) es la posición calculada y (x_r, y_r) es la posición real.

$$\sqrt{(x_r - x_c)^2 + (y_r - y_c)^2} \quad (2.3)$$

2.2 Criterios de inclusión y exclusión

Como criterio de inclusión para el proyecto se considera a los métodos de localización basados en resolver el problema de la intersección de circunferencias en dos

dimensiones, como la trilateración y la multilateración, esto debido a su simplicidad de modelado y que FLoRa proporciona los valores de RSSI con los cuales se obtiene la distancia de la antena al nodo, permitiendo resolver el sistema de ecuaciones 2.1.

Otro criterio de inclusión es que la trayectoria que traza el nodo sea determinística, en este caso se usa una circunferencia, pero podría ser cualquier trayectoria en la cual se conozcan todos sus puntos de recorrido, esto es para tener reproducibilidad y poder comprobar si los valores calculados se aproximan a los reales.

Como criterio de exclusión para el proyecto se considera a los métodos de localización que no estén basados en resolver el problema de la intersección de las tres circunferencias, ya que su modelado es más complejo.

Otro criterio de exclusión es que la trayectoria del nodo sea probabilística, ya que no se tendría reproducibilidad y no se podrían comprobar los valores de la posición calculada con la posición real.

2.3 Métricas de evaluación de la plataforma

Se mide el consumo de energía del nodo en la red LoRaWAN y la precisión del cálculo de la posición para comprobar que consume menos energía que GPS y comparar la precisión con la de GPS, los datos de consumo de energía en GPS se obtienen mediante la literatura ya que solo se simula una red LoRaWAN, de esta manera se realiza una prueba de concepto de que LoRaWAN es una alternativa viable para localización frente a GPS.

El consumo de energía se mide en Watts y es proporcionado por el modelo de simulación FLoRa, para tener seguridad de que los valores no son resultado de un error de software espontáneo se repite la simulación varias veces para verificar que los valores de energía consumida son consistentes.

El valor que se usa para medir la distancia de las antenas al nodo es el RSSI, el cual es proporcionado por FLoRa en decibelios (dB), primero se guardan los valores de RSSI colocando al nodo a distancias conocidas, para luego realizar una regresión lineal e inferir a partir del RSSI la distancia que hay entre las antenas y el nodo a distancias que no han sido guardadas anteriormente.

2.4 Métrica de satisfacción del usuario

Se define como usuario a la persona que está haciendo uso de la simulación en OMNeT++, y de los programas en python para el cálculo de la posición y la precisión. La medida con la que se evalúa la satisfacción del usuario es el tiempo que tarda en realizarse la simulación, el cálculo de la posición, y precisión, para esto se simula una red con un solo nodo y se va aumentando poco a poco los nodos para verificar si el tiempo de espera aumenta y por lo tanto la experiencia del usuario se degrada.

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

La red LoRaWAN consta de 3 LoRa gateways, 1 nodo móvil, y router que conecta a los 3 gateways, 1 red que simula a internet, otro router del lado del servidor que sirve para conectar el servidor a la red LoRaWAN, y el servidor principal. Se usan 3 gateways para realizar trilateración y encontrar la posición del nodo móvil mediante la resolución del sistema de ecuaciones 2.1, la distancia entre los gateways y el nodo se halla usando el RSSI. El cálculo de la posición se realiza en un script por separado. A continuación se presenta un diagrama con el proceso que se lleva a cabo para obtener la ubicación del nodo móvil.

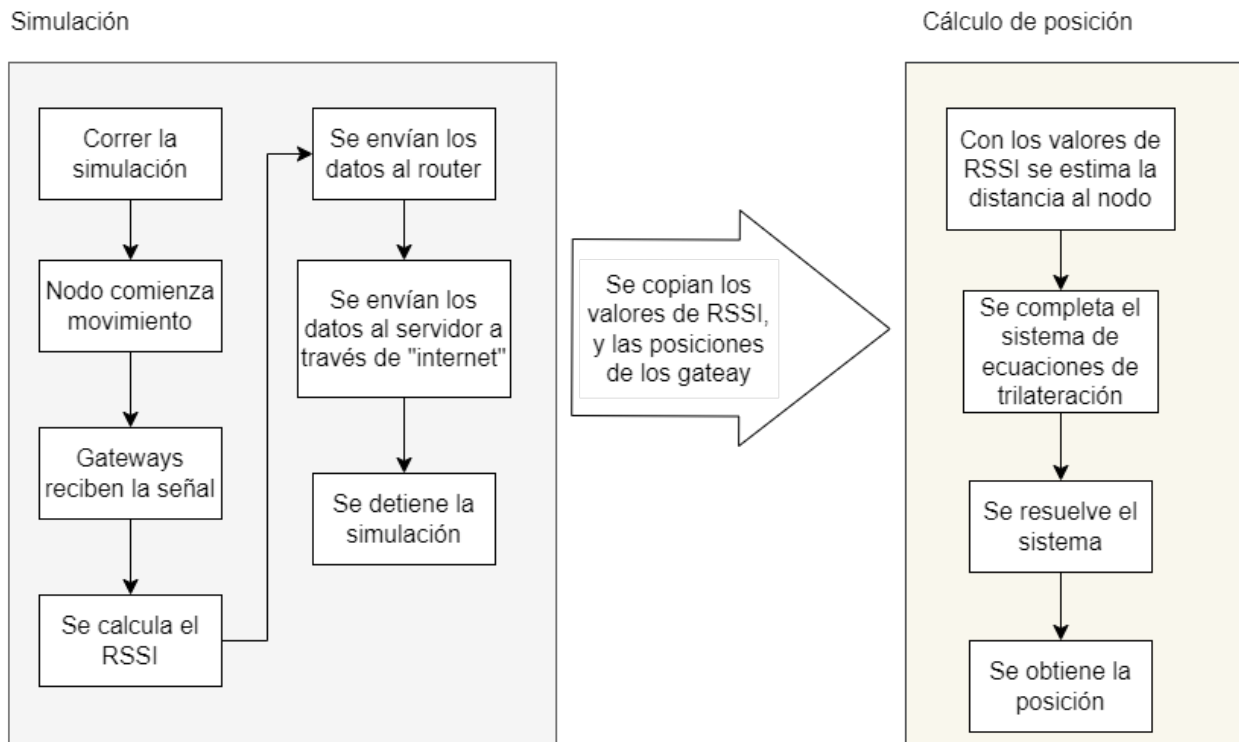


Figura 3.1: Proceso para obtener la posición del nodo

3.1 Relación distancia - RSSI

Antes de iniciar el proceso mencionado, se establece una relación entre la distancia de los gateways al nodo y el valor de RSSI, es decir la intensidad de la señal recibida por los gateways, para LoRa estos valores fluctúan entre -130 dB y -30 dB siendo -130 dB una intensidad muy baja, lo que indica que el dispositivo está muy alejado y -30 dB una intensidad fuerte, lo que indica que el dispositivo esta cerca.

Experimentalmente se realizan varias simulaciones conociendo la distancia entre el nodo y el gateway, obteniendo el valor de RSSI en el gateway, luego se varía la distancia del nodo y se vuelve a extraer el valor RSSI. A continuación se muestra esto en forma de diagrama para una mejor comprensión.

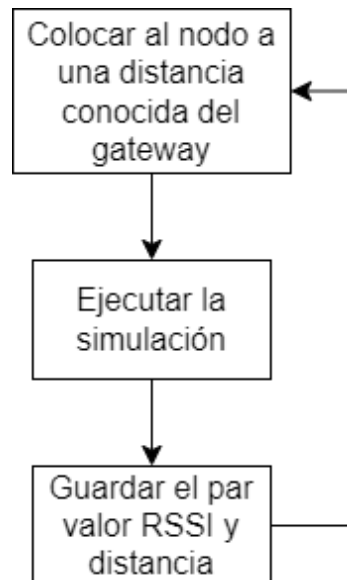


Figura 3.2: Obtención de la distancia usando el RSSI.

Ejecutando varias veces este proceso se puede construir una relación entre el RSSI y la distancia, como se muestra en la tabla 3.1 y en la figura 3.3. Hay que recalcar que esto se hace manualmente, por lo que toma un tiempo considerable dependiendo de cuántas medidas se tomen.

Tabla 3.1: Relación entre el RSSI y la distancia entre el gateway y el nodo.

RSSI [dB]	Distancia [m]
-105.061	10
-111.322	20
-114.984	30
-115.38	40
-117.395	50
-119.042	60
-120.879	70
-120.655	80
-121.719	90
-124.757	100
-125.618	110
-126.404	120
-126.471	130
-125.71	140

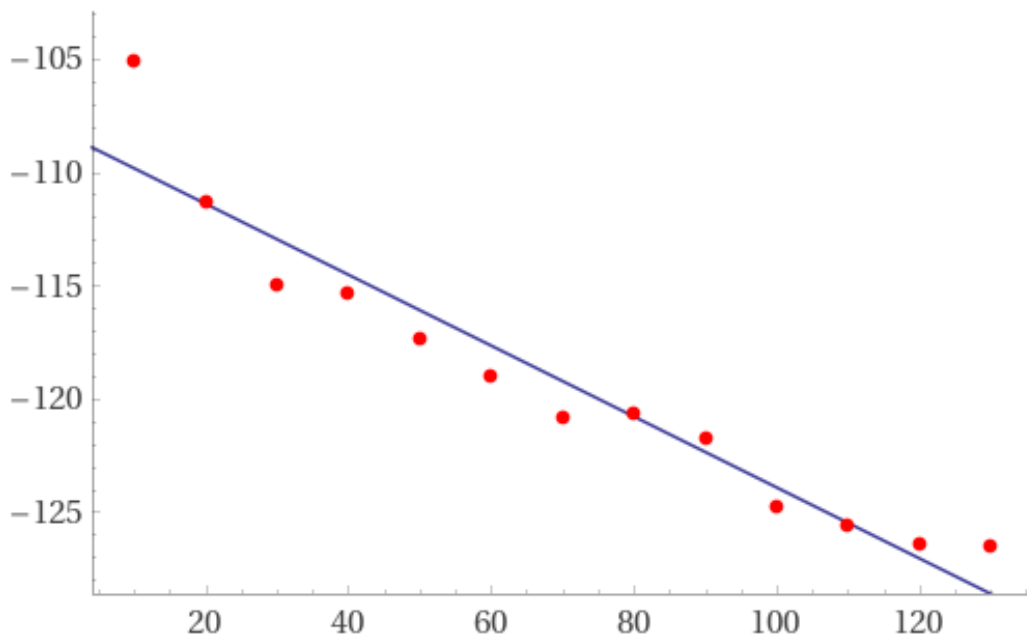


Figura 3.3: Gráfico de la relación entre la distancia y el RSSI, el eje X es la distancia y el eje Y es el RSSI.

3.2 Simulación

Para la simulación se usa el diseño planteado en la sección 2.1.1, el nodo móvil va recorriendo su trayectoria circular y constantemente se envían tramas hacia los gateways para obtener el RSSI correspondiente a cada uno, estos valores se muestran por consola y son copiados manualmente para verificar a que distancia corresponden usando la tabla 3.1, de esta manera se obtienen todos los datos necesarios para resolver el sistema de ecuaciones 2.1.

A continuación, se muestra una toma del nodo en movimiento enviando tramas a los tres gateways para obtener el valor de RSSI de cada uno, se puede observar en verde la trayectoria circular del nodo, el envío de las tramas se simboliza por las líneas rojas apuntando hacia los gateways, y en la parte de abajo se observa la consola con los valores de RSSI de cada gateway resaltados en amarillo.

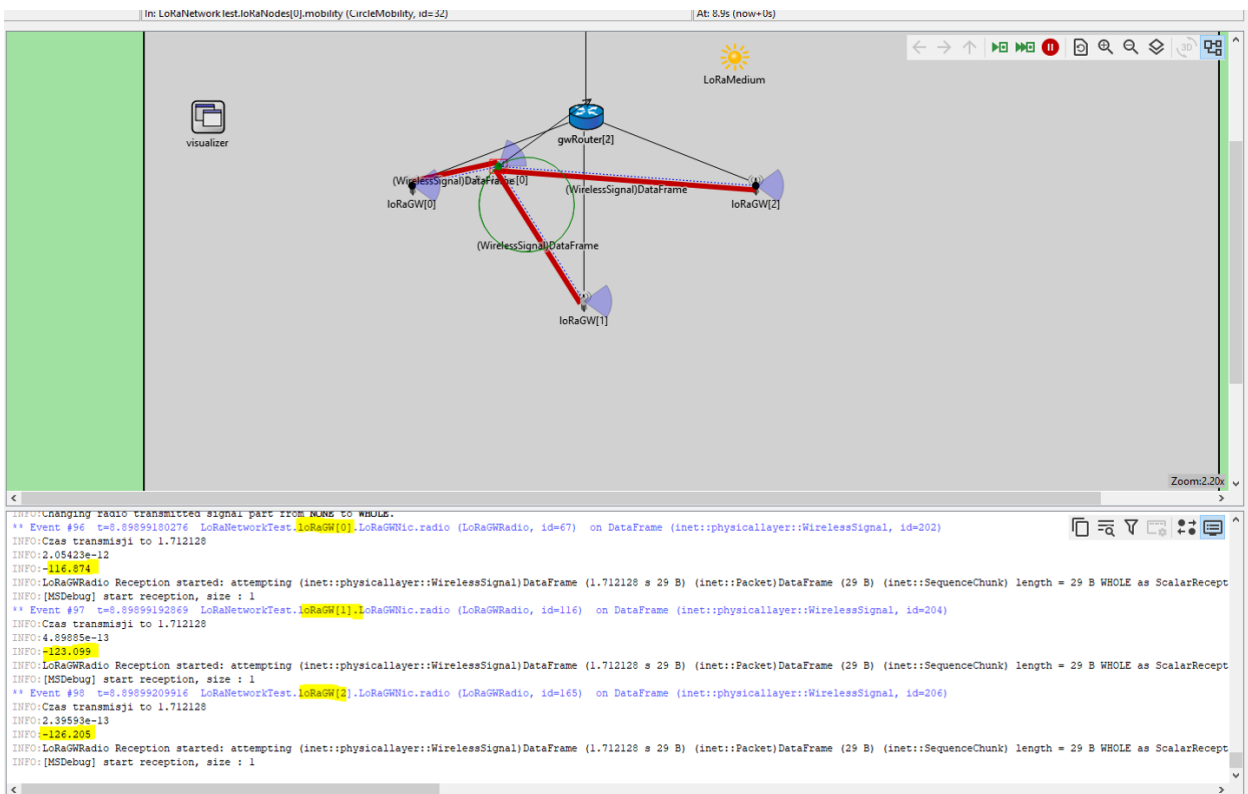


Figura 3.4: Nodo moviéndose y enviando tramas que contienen el valor del RSSI.

OMNeT++ cuenta con tres formas de ejecutar una simulación, la primera forma, llamada *Run*, es la ejecución con todas las animaciones correspondientes para que sea visualmente más atractiva y además se registran todos los eventos que suceden en la red, la segunda forma se llama *Fast Run* y ejecuta la simulación de manera rápida sin mostrar animaciones pero registrando ciertos eventos de la red, y la tercera forma se llama *Express Run*, en la cual no se muestran animaciones y no se registran los eventos de la red, solo se muestra el tiempo que tomó finalizar la simulación, esta es la forma más rápida de ejecutar la simulación.

Para la simulación de la red LoRaWAN se usa la primera forma, *Run*, porque permite ver la movilidad del nodo, y todos los eventos de la red se muestran por consola, permitiendo obtener los valores de la potencia usada y el RSSI de los gateways y el nodo, esto hace que la simulación tome un par de minutos para finalizar, ya que la animación va paso a paso y esto es lo que toma más tiempo. En cuanto a la cantidad de nodos que puede soportar la simulación, depende del hardware del ordenador, sin embargo, los desarrolladores de FLoRa han podido simular un red LoRaWAN hasta con 700 nodos [1].

3.3 Cálculo de la posición

Ahora que se tienen las distancias, y las posiciones de los gateways son conocidas, se puede resolver el sistema de ecuaciones 2.1. Pero para que implementar esto en código sea más simple primero se manipulan algebraicamente las ecuaciones, recordando que el par (x,y) es la posición del nodo, es decir, lo que se quiere encontrar, (x_0,y_0) es la posición del gateway 1, (x_1,y_1) es la posición del gateway 2, (x_2,y_2) es la posición del gateway 3, las que cuales son conocidas, r_0 , r_1 y r_2 son las distancias del gateway 1, 2 y 3 hacia el nodo. La solución del sistema queda de la siguiente manera:

$$\begin{cases} x = \frac{CE - FB}{EA - BD} \\ y = \frac{CD - AF}{BD - AE} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A = -2x_0 + 2x_1 \\ B = -2y_0 + 2y_1 \\ C = r_0^2 - r_1^2 - x_0^2 + x_1^2 - y_0^2 + y_1^2 \\ D = -2x_1 + 2x_2 \\ E = -2y_1 + 2y_2 \\ F = r_1^2 - r_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2 \end{array} \right. \quad (3.2)$$

La implementación del código en Python para calcular la posición queda de la siguiente manera usando las ecuaciones mostradas anteriormente:

Código 3.1: Código de Procesamiento para trilateración

```
def find_node(x0,y0,r0,x1,y1,r1,x2,y2,r2):
    A = 2*x1 - 2*x0
    B = 2*y1 - 2*y0
    C = r0**2 - r1**2 - x0**2 + x1**2 - y0**2 + y1**2
    D = 2*x2 - 2*x1
    E = 2*y2 - 2*y1
    F = r1**2 - r2**2 - x1**2 + x2**2 - y1**2 + y2**2
    x = (C*E - F*B) / (E*A - B*D)
    y = (C*D - A*F) / (B*D - A*E)
    return x,y

x,y = find_node(x0,y0,r0,x1,y1,r1,x2,y2,r2)

print ("Posición del nodo:")
print (x,y)
```

Luego de calcular la posición simplemente se muestra por pantalla para que el usuario pueda verla claramente, si se quiere comparar con la ubicación real se debe revisar la posición del nodo en la simulación.

3.4 Capacidad de la Red y Pruebas de Rendimiento

La simulación propuesta dado a que está basada en el Flora framework tiene sus propios parámetros que influyen en el rendimiento de la red, tales como: el tiempo máximo que toma una transmisión, la repetición de envíos de paquetes, la longitud de la trama, el tiempo que dura la simulación, el tiempo de envío para el próximo paquete. Siendo estos parámetros libres de modificar por el usuario dificulta identificar el rendimiento de la red bajo estrés ya que estos parámetros influyen de manera significativa en la capacidad de la misma. En escenarios de aplicaciones reales tal como [30] se puede observar como la mayor fiabilidad del rendimiento de una red LoRaWAN es mediante experimentación y análisis de los parámetros influyentes. Por lo que se sugiere modelar los parámetros deseados según la aplicación final de la red y experimentar el cambio de los mismos, para la topología inicial propuesta en esta red se logra incrementar el número de nodos móviles hasta 5 con la limitante que se consumen recursos del ordenador que ejecuta la simulación.

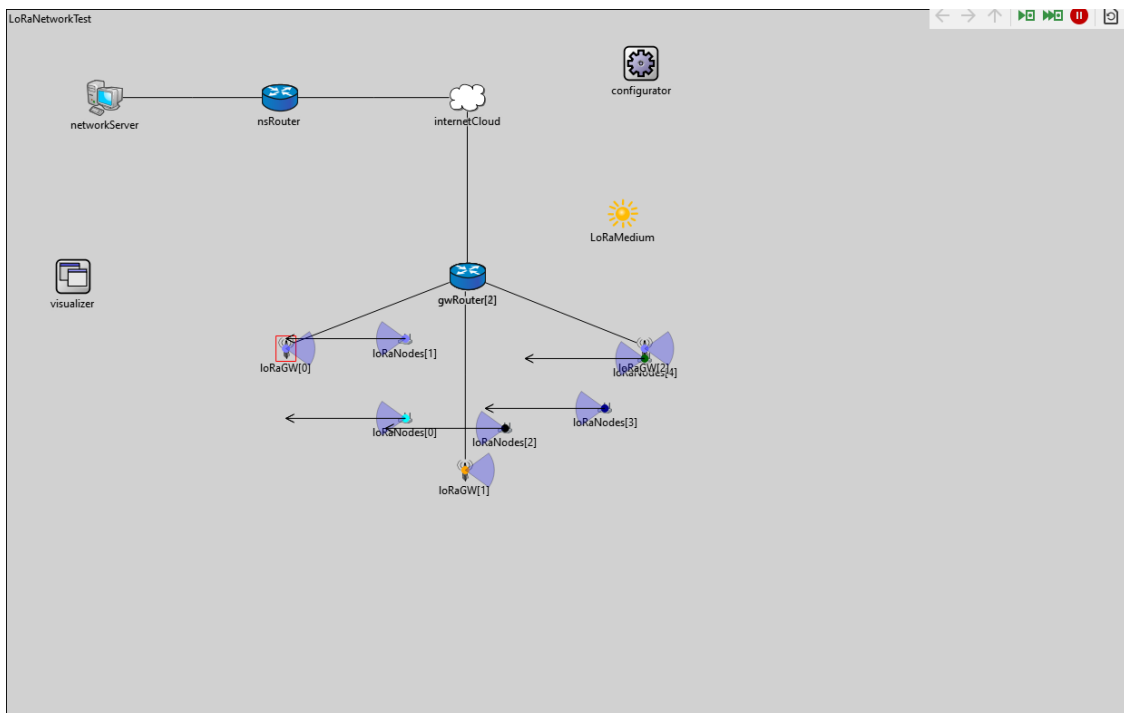


Figura 3.5: Topología con 5 nodos móviles

Teniendo un ordenador de 4 CPU y 8GB de RAM estos recursos se consumen casi en su totalidad.

En la topología se pueden observar 5 nodos móviles, tres gateways fijos, un router y un servidor, esta configuración permite aplicaciones de geoposicionamiento ya que cumple con el principio de trilateración al estar todos los nodos móviles dentro del área de cobertura de los 3 gateways al mismo tiempo, para esto también se ha configurado los parámetros de movilidad de los nodos móviles de manera que al moverse no salgan del radio de cobertura de los 3 gateways. Es posible tener otro tipo de configuración pero ese depende de la finalidad de la red, por ejemplo si el usuario necesita una red de más cobertura podría establecer las coordenadas de los gateways más alejadas entre sí, de la misma forma se puede optar por otro módulo de movilidad para los nodos teniendo en cuenta que deben estar dentro de la cobertura de los 3 gateways todo el tiempo.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El propósito del proyecto es simular una red LoRaWAN en OMNet++ usando el modelo de simulación FLoRa para comprobar que puede ser usado para localización de un nodo móvil, y además que el consumo de energía es bajo comparado al de GPS, la otra tecnología que se usa para localización. Por lo tanto, las pruebas que se han realizado son de precisión de ubicación usando trilateración y de consumo de energía en los gateways, los datos que se necesitan para realizar estas pruebas como el RSSI, y la potencia consumida, son proporcionados por el modelo FLoRa.

4.1 Métricas de evaluación de la plataforma

Se realizan 4 obtenciones de la posición dentro de la simulación para probar que los valores de uso de energía y la precisión son consistentes mientras el nodo se mueve. Los resultados son presentados de la siguiente manera, en cada envío de trama se muestran dos tablas, la primera tabla contiene los datos de los 3 gateways, que son, el RSSI, la distancia al nodo usando los valores de la tabla 3.1, y la potencia consumida en miliWatts (mW), la segunda tabla contiene los datos del nodo, que son, la posición calculada a través de trilateración, la posición real, el error entre las dos y la potencia consumida en miliWatts (mW).

En la primera obtención de datos de la simulación en el envío de la primera trama se observa en la tabla 4.2 que el RSSI del gateway 1 es -111.844 dB lo que según la tabla 3.1 corresponde aproximadamente a una distancia de 20 metros al nodo, y la potencia consumida es de 2.054 mW. Para el gateway 2 el RSSI es de -121.424 dB, la distancia al nodo es de 30 metros, y la potencia consumida es de 0.489 mW. El tercer gateway tiene un RSSI de -127.666 dB, lo que corresponde a una distancia aproximada de 130 metros,

Tabla 4.1: Posición de los gateways, estas son fijas.

Gateway	X	Y
1	140	170
2	230	231
3	320	170

Tabla 4.2: Datos obtenidos de los gateways en el envío de la primera trama.

Gateway	RSSI [dB]	Distancia [m]	Potencia consumida [mW]
1	-111.844	20	2,054
2	-121.424	30	0.489
3	-127.666	130	0.239

Tabla 4.3: Posición encontrada en el envío de la primera trama.

Posición encontrada (\hat{x}, \hat{y})	Posición real (x, y)	Error [m]	Potencia consumida [mW]
(184.167, 197.631)	(184.258, 199.363)	1.73	25.119

y la potencia consumida es de 0.239 mW.

Con los valores de la distancia se resuelve el sistema de ecuaciones implementado en el código 3.1 y como se ve en la tabla 4.3 el nodo está en la posición (184.167, 197.631), aunque la posición real es (184.258, 199.363), fallando por tan solo 1.73 metros, y usando una potencia de 25.119 mW.

Tabla 4.4: Datos de los gateways en el envío de la segunda trama.

Gateway	RSSI [dB]	Distancia [m]	Potencia consumida [mW]
1	-116,874	45	3.154
2	-123,099	95	0.403
3	-126,205	120	0.228

En el envío de la segunda trama se observa en la tabla 4.4 que el RSSI del gateway 1 es -116.874 dB lo que según la tabla 3.1 corresponde aproximadamente a una distancia de 45 metros al nodo, y la potencia consumida es de 3.154 mW. Para el gateway 2 el RSSI es de -123.099 dB, la distancia al nodo es de 95 metros aproximadamente, y la

Tabla 4.5: Posición encontrada en el envío de la segunda trama

Posición encontrada (\hat{x}, \hat{y})	Posición real (x, y)	Error [m]	Potencia consumida [mW]
(195.625, 127.447)	(191.475, 156.498)	29.34	25.119

potencia consumida es de 0.403 mW. El tercer gateway tiene un RSSI de -126.205 dB, lo que corresponde a una distancia aproximada de 120 metros, y la potencia consumida es de 0.228 mW.

Con los valores de la distancia se resuelve el sistema de ecuaciones implementado en el código 3.1 y como se ve en la tabla 4.5 el nodo está en la posición (195.625, 127.447), aunque la posición real es (191.475, 156.498), fallando por 29.34 metros, y usando una potencia de 25.119 mW.

Tabla 4.6: Datos de los gateways en el envío de la tercera trama.

Gateway	RSSI [dB]	Distancia [m]	Potencia consumida [mW]
1	-116,622	45	2.176
2	-117,326	50	1.851
3	-120,529	70	0.885

Tabla 4.7: Posición encontrada en el envío de la tercera trama.

Posición encontrada (\hat{x}, \hat{y})	Posición real (x, y)	Error [m]	Potencia consumida [mW]
(222.014, 141.996)	(209.841, 160.02)	21.75	25.119

En el tercer envío de la trama se observa en la tabla 4.6 que el RSSI del gateway 1 es -116,622 dB lo que según la tabla 3.1 corresponde aproximadamente a una distancia de 45 metros al nodo, y la potencia consumida es de 2.176 mW. Para el gateway 2 el RSSI es de -117,326 dB, la distancia al nodo es de 50 metros aproximadamente, y la potencia consumida es de 1.851 mW. El tercer gateway tiene un RSSI de -120,529 dB, lo que corresponde a una distancia aproximada de 70 metros, y la potencia consumida es de 0.885 mW.

Con los valores de la distancia se resuelve el sistema de ecuaciones implementado en el código 3.1 y como se ve en la tabla 4.7 el nodo está en la posición (222.014, 141.996),

aunque la posición real es (209.841, 160.02), fallando por 21.75 metros, y usando una potencia de 25.119 mW.

Tabla 4.8: Datos de los gateways en el envío de la cuarta trama.

Gateway	RSSI [dB]	Distancia [m]	Potencia consumida [mW]
1	-116,874	45	2.054
2	-123,099	95	0.489
3	-126,205	130	0.239

Tabla 4.9: Posición encontrada en el envío de la cuarta trama.

Posición encontrada (\hat{x}, \hat{y})	Posición real (x, y)	Error [m]	Potencia consumida [mW]
(188.681, 137.693)	(185.199, 159.852)	22.43	25.119

En el envío de la cuarta trama se observa en la tabla 4.8 que el RSSI del gateway 1 es -116,874 dB lo que según la tabla 3.1 corresponde aproximadamente a una distancia de 45 metros al nodo, y la potencia consumida es de 2.054 mW. Para el gateway 2 el RSSI es de -123,099 dB, la distancia al nodo es de 95 metros aproximadamente, y la potencia consumida es de 0.489 mW. El tercer gateway tiene un RSSI de -126,205 dB, lo que corresponde a una distancia aproximada de 130 metros, y la potencia consumida es de 0.239 mW.

Con los valores de la distancia se resuelve el sistema de ecuaciones implementado en el código 3.1 y como se ve en la tabla 4.9 el nodo está en la posición (188.681, 137.693), aunque la posición real es (185.199, 159.852), fallando por 22.43 metros, y usando una potencia de 25.119 mW.

Tabla 4.10: Promedio del error en la posición.

Error trama 1 [m]	Error trama 2[m]	Error trama 3 [m]	Error trama 4 [m]	Promedio [m]
1.73	29.34	21.75	22.43	18.81

Como se puede observar, el nodo usa una potencia de 25.119 mW durante el envío de las 4 tramas del recorrido, comparando esto con los 166 mW que puede llegar a usar

un receptor GPS [10], se comprueba que usar LoRa es energéticamente más eficiente que usar GPS, en concreto en este caso el nodo LoRa usa casi 7 veces menos potencia.

En cuanto a la precisión, teniendo en cuenta las 4 tramas analizadas de la simulación, en promedio se tiene que el error en la posición es de 18.81 metros, el error más pequeño es de 1.73 [m], y el más grande es de 29.34 [m], en comparación con GPS se puede decir que está dentro del mismo orden de magnitud [10].

Con los resultados obtenidos se realiza una comparativa respecto a otras tecnologías enfocadas a geoposicionamiento, por ejemplo un uso cotidiano es el caso de teléfonos móviles, estos dispositivos cuentan con diferentes tecnologías que puede emplearse para el geoposicionamiento. Según trabajos relacionados[31] un teléfono móvil consume diferentes valores de energía según utilice sus módulos GSM, WiFi o GPS. Sin tomar en cuenta los gateways y solo en nodo móvil según el modelo utilizado en este trabajo se obtiene una mejora del consumo energético que se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 4.11: Consumo energético en un dispositivo móvil.

Nodo LoRa Simulado [mW]	Módulo GPS [mW]	Módulo WiFi [mW]	Módulo GSM [mW]
25.119	400	35	40

Estos valores dependen también de varios factores como modelo del chip utilizado, modelo del dispositivo, condiciones de uso, entre otros; pero es posible evidenciar que para aplicaciones de geoposicionamiento el dispositivo LoRaWAN sigue siendo eficiente desde el punto de vista energético.

4.2 Métricas de satisfacción del usuario

Se solicitó al cliente responder a preguntas acerca de la simulación realizada en este trabajo con la finalidad de evaluar su satisfacción con la propuesta presentada.

¿Le resultó fácil de entender la topología de la Red? *

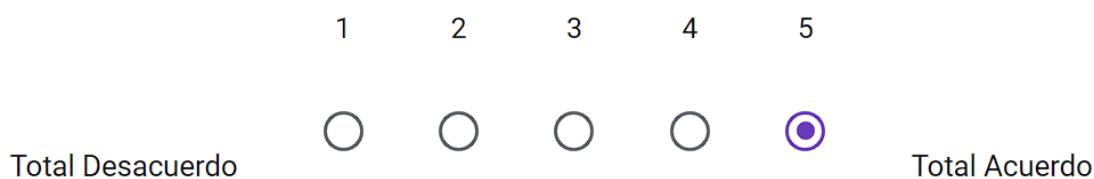


Figura 4.1: Pregunta 1. Topología de la Red

Es un gran indicativo que la topología de la Red resulte fácil de comprender para el cliente ya que podrá hacer un uso óptimo de la misma.

¿Le fue sencillo identificar los parámetros configurables dentro del archivo "omnet.ini"? *

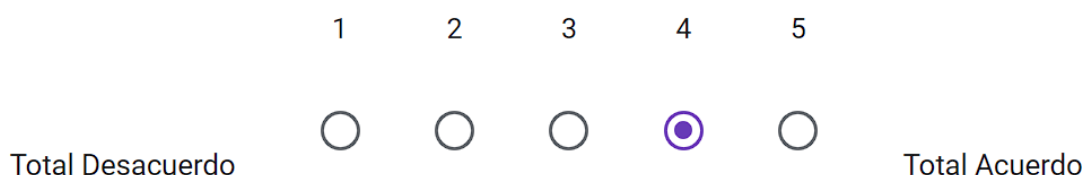


Figura 4.2: Pregunta 2. Parámetros Configurables

Este resultado indica que aunque a primera vista no todos los parámetros configurables pueden ser identificados por el cliente, la mayoría si lo son, lo que permitirá un manejo más adecuado de los parámetros según el cliente lo requiera.

¿En base a los resultados observados, utilizaría este modelo para proyectos futuros? *

1 2 3 4 5

Total Desacuerdo Total Acuerdo

Figura 4.3: Pregunta 3.Utilización de la propuesta

Una respuesta favorable ya que se puede apreciar las ventajas del modelo propuesto y sus aplicaciones en proyectos multidisciplinarios.

¿Considera usted que el código desarrollado en Python facilita el procesamiento de los datos? *

1 2 3 4 5

Total Desacuerdo Total Acuerdo

Figura 4.4: Pregunta 4. Procesamiento en Python

En complemento con el modelo presentado es importante como se procesan los datos de interés para que sean de mayor utilidad, por lo que el código propuesto es de gran ayuda para el cliente lo cual es evidenciado con la respuesta positiva.

En conclusión se han obtenido respuestas favorables por parte del cliente por lo que desde la perspectiva del mismo el modelo propuesto cumple con sus requerimientos.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Para las conclusiones de este proyecto se tienen en cuenta los objetivos planteados en capítulo 1, recordando que como objetivo general se tiene que se debe simular una red LoRaWAN usando el modelo de simulación FLoRa en OMNeT++ para el cálculo de la ubicación de un nodo móvil en exteriores.

5.1 Conclusiones

Se logra el objetivo de simular una red LoRaWAN usando FLoRa como modelo de simulación para probar que se puede obtener la posición de un nodo móvil usando trilateración. Esto se hizo para demostrar que LoRaWAN es una alternativa viable a GPS en el ámbito de la localización, como se observa en los resultados del capítulo anterior, un nodo LoRa usa hasta 7 veces menos potencia que GPS, lo que se traduce a un ahorro de batería sustancial, una de las consecuencias de esto es que las baterías se degradan con menor rapidez, haciendo que se desechen con menos frecuencia, esto ayuda al medio ambiente ya que las baterías de litio usadas tienen componentes tóxicos para el ambiente.

El método de localización usado es el de trilateración debido a la simplicidad para modelarlo e implementarlo en código, según los resultados del capítulo anterior, en esta simulación, usando 4 tomas de la trayectoria circular que recorre el nodo se concluye que la precisión con la que se estima la posición es del mismo orden de magnitud que la de GPS en exteriores, el error promedio en la posición usando LoRaWAN es de 18.81 metros, siendo el error mínimo de 1.73 metros y el error máximo de 29.34.

Debido a que el software de simulación usado no está diseñado para calcular las interacciones físicas que ocurren dentro de espacios interiores como por ejemplo, un edificio, solo se puede usar esta herramienta para experimentar con escenarios en

exteriores, sin embargo, si se pueden realizar simulaciones de gran cantidad de nodos como lo hicieron los desarrolladores del modelo en [1]. Además, FLoRa cuenta con una licencia LGPL (Lesser General Public License) lo que permite la modificación y distribución del código fuente ¹, así mismo OMNeT++ cuenta con una licencia de código abierto que permite su libre uso, modificación y distribución por parte de estudiantes y organizaciones sin fines de lucro ², esto es de gran importancia que, ya en el futuro esta plataforma de simulación puede tener aplicaciones y herramientas nuevas que permitan una exploración más variada de tecnologías como LoRaWAN.

Encontrar la relación entre la distancia del gateway hacia el nodo y el RSSI toma un tiempo considerable ya que el proceso va de la siguiente manera, primero se coloca el nodo a una distancia conocida de los gateways, luego se corre la simulación, se guarda el valor de RSSI correspondiente y se detiene la simulación, después se mueve el nodo a una distancia conocida y se repite el proceso, si se quiere tener una relación más precisa entre la distancia y el RSSI se deben realizar movimientos más cortos en el nodo, es decir, la distancia nueva a la que se desplaza debe ser pequeña, entonces entre más precisión se quiera más tiempo toma obtener la relación.

El proceso de cálculo de la posición es manual, lo cual hace que tome más tiempo si se aumenta la complejidad de la red, por ejemplo, agregando más nodos móviles, el proceso para calcular la posición va de la siguiente manera, primero se supone que se ha construido con anticipación la relación entre la distancia entre los gateways y el nodo mediante el RSSI, luego se corre la simulación y por la consola de OMNeT++ se puede observar el RSSI que van registrando los gateways, luego estos valores se comparan con la relación previamente obtenida para estimar la distancia, y ahora que se tienen todos los datos necesarios para resolver el sistema de ecuaciones de trilateración se procede a ingresar esos datos a un script de python que resuelve el sistema y muestra por pantalla la posición calculada.

5.2 Recomendaciones

La trayectoria que se define para el nodo es una circunferencia ya que viene implementada en FLoRa, esto facilita la programación ya que no hay que preocuparse

¹<https://github.com/florasim/flora/blob/master/LICENSE.md>

²<https://github.com/omnetpp/omnetpp/blob/master/doc/License>

de programar desde cero una trayectoria, otro aspecto importante de esto es que al ser determinista la trayectoria, el experimento se vuelve reproducible y se puede probar si métodos de localización diferentes pueden obtener una mejor estimación de la posición.

Se pueden poner muchos nodos móviles usando FLoRa, el impedimento es que esto requiere de más recursos del computador, por lo que se debe aumentar el número de nodos con cautela para no dejar el ordenar en estado vegetal.

Para la construcción de la relación entre la distancia del gateway al nodo y el RSSI se debe tener en cuenta que se debe probar un cierto rango de distancias para tener información suficiente para las simulaciones, por ejemplo, aquí se han probado desde los 10 hasta los 140 metros como se puede observar en la tabla 3.1, sin embargo el rango puede variar dependiendo de lo que se desee evaluar, esto significa que si se quiere tener un rango muy amplio se deben realizar más mediciones, lo que toma más tiempo.

Para el cálculo de la posición se copian manualmente los valores de RSSI que muestra OMNeT++ en su consola, para luego ser procesados por un script escrito en python que calcula la posición del nodo, se escogió python debido a su simpleza, sin embargo, para automatizar el proceso valdría la pena que se pruebe si es posible evitar este cálculo externo, y en su lugar usar C++ dentro de OMNeT++ para captar el RSSI y resolver las ecuaciones de trilateración directamente dentro de la simulación.

Se recomienda instalar la versión 6 de OMNeT++ para obtener la última de versión de FLoRa fácilmente, ya que al inicio se intentó instalar FLoRa usando la versión 5 de OMNeT++ y no apareció la opción de instalar el modelo de FLoRa, en cambio en la versión 6 de OMNeT++ aparece la opción de instalación de FLoRa sin mayor esfuerzo.

5.3 Líneas futuras

Se puede usar el ambiente de simulación para probar la precisión de ubicación de otro tipo de métodos de ubicación que no se basen en la potencia de la señal, como por ejemplo métodos basados en la tiempo que tarda la señal en llegar al receptor y en regresar al emisor, como son ToA (Time of Arrival) y TDoA (Time Difference of Arrival).

La relación de la distancia entre el gateway y el nodo se puede hacer más precisa si se toman medidas en intervalos más pequeños, sin embargo, esto toma más tiempo ya que se realiza de forma manual, para mejorar esto se podría investigar si el programa

de simulación cuenta con alguna opción que permita automatizar este proceso, como se describe en la figura 3.2, también podrían usarse redes neuronales para no tener que tomar tantas medidas y obtener un mejor resultado.

Para agilizar el proceso de cálculo de la posición se podría investigar si es posible hacer que OMNeT++ envíe directamente los valores de RSSI a otro programa para realizar el cálculo de trilateración, de esa manera se evitaría el proceso actual de copiar los datos manualmente, esto permitiría aumentar el número de nodos sin que sea excesivamente complicado para el usuario realizar el cálculo de la posición. Una de las mayores aplicaciones para futuros trabajos es la propuesta de desarrollar una aplicación que utilice de manera efectiva los datos obtenidos por esta red, por ejemplo obtenidas las coordenadas estas puedan ser ubicadas sobre un mapa en tiempo real lo cual le brindaría más posibilidades para posibles usuarios finales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Slabicki, G. Premsankar, and M. Di Francesco, “Adaptive configuration of lora networks for dense IoT deployments,” in *NOMS 2018 - 2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, pp. 1–9, 2018.
- [2] M. Yassin and E. Rachid, “A survey of positioning techniques and location based services in wireless networks,” in *2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES)*, pp. 1–5, 2015.
- [3] B. Chaudhari and S. Borkar, “2 - Design considerations and network architectures for low-power wide-area networks,” in *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications* (B. S. Chaudhari and M. Zennaro, eds.), pp. 15–35, Academic Press, 2020.
- [4] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, “A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment,” *ICT Express*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2019.
- [5] H. Jradi, A. E. Samhat, F. Nouvel, M. Mroue, and J.-C. Prévotet, “Overview of the mobility related security challenges in LPWANs,” *Computer Networks*, vol. 186, p. 107761, 2021.
- [6] C. Joshitha, P. Kanakaraja, M. D. Bhavani, Y. N. V. Raman, and T. Sravani, “LoRaWAN based Cattle Monitoring Smart System,” in *2021 7th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, pp. 548–552, 2021.
- [7] B. C. Fargas and M. N. Petersen, “GPS-free geolocation using LoRa in low-power WANs,” in *2017 Global Internet of Things Summit (GloTS)*, pp. 1–6, 2017.
- [8] P. Luna, S. Gutiérrez, and R. Espinosa, “Design and Implementation of a Node Geolocation System for Fire Monitoring through LoRaWAN,” in *2020 IEEE*

International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), vol. 4, pp. 1–6, 2020.

- [9] H. Kwasme and S. Ekin, "RSSI-Based Localization Using LoRaWAN Technology," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 99856–99866, 2019.
- [10] K. Chen, G. Tan, J. Cao, M. Lu, and X. Fan, "Modeling and Improving the Energy Performance of GPS Receivers for Location Services," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 8, pp. 4512–4523, 2020.
- [11] M. Qadrdan, N. Jenkins, and J. Wu, "Chapter II-3-D - Smart Grid and Energy Storage," in *McEvoy's Handbook of Photovoltaics (Third Edition)* (S. A. Kalogirou, ed.), pp. 915–928, Academic Press, third edition ed., 2018.
- [12] S. jun Gao, W. feng Liu, D. ju Fu, and X. guang Liu, "Research progress on recovering the components of spent Li-ion batteries," *New Carbon Materials*, vol. 37, no. 3, pp. 435–460, 2022.
- [13] C. Bouras, A. Gkamas, V. Kokkinos, and N. Papachristos, "Real-Time Geolocation Approach through LoRa on Internet of Things," in *2021 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, pp. 186–191, 2021.
- [14] M. Silvagni, A. Tonoli, E. Zenerino, and M. Chiaberge, "Multipurpose UAV for search and rescue operations in mountain avalanche events," *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 8, no. 1, pp. 18–33, 2017.
- [15] J. Wang and J. G. Park, "IEEE 802.11 WLAN based Indoor Positioning Algorithm using Weight Grey Prediction Model," in *2020 IEEE 22nd International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 18th International Conference on Smart City; IEEE 6th International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS)*, pp. 1158–1165, 2020.
- [16] C.-H. Lin, L.-H. Chen, H.-K. Wu, M.-H. Jin, G.-H. Chen, J. L. Garcia Gomez, and C.-F. Chou, "An Indoor Positioning Algorithm Based on Fingerprint and Mobility Prediction in RSS Fluctuation-Prone WLANs," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 51, no. 5, pp. 2926–2936, 2021.

- [17] L. Li, J. Ren, and Q. Zhu, "On the application of LoRa LPWAN technology in Sailing Monitoring System," in *2017 13th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, pp. 77–80, 2017.
- [18] Z. Meng and J. Li, "Research on Real-Time Monitoring System of Miners' Work and Health based on LPWAN," in *2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-Taiwan)*, pp. 1–2, 2020.
- [19] H. Andre, R. W. Pratama, F. S. Utari, Y. I. Oktapianus, T. Yuliswar, Darmawan, D. W. Sukma Nirad, A. K. Vadreass, and J. Rahmadoni, "LPWAN Communication in IoT Network for Electrical Energy Monitoring," in *2022 International Symposium on Information Technology and Digital Innovation (ISITDI)*, pp. 32–35, 2022.
- [20] G. M. Bianco, A. Mejia-Aguilar, and G. Marrocco, "Performance evaluation of LoRa LPWAN technology for mountain Search and Rescue," in *2020 5th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, pp. 1–4, 2020.
- [21] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, "Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 5, pp. 60–67, 2016.
- [22] J. Purohit, X. Wang, S. Mao, X. Sun, and C. Yang, "Fingerprinting-based Indoor and Outdoor Localization with LoRa and Deep Learning," in *GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference*, pp. 1–6, 2020.
- [23] W. Ingabire, H. Larijani, R. M. Gibson, and A.-U.-H. Qureshi, "LoRaWAN Based Indoor Localization Using Random Neural Networks," *Information*, vol. 13, no. 6, 2022.
- [24] A. Zanella, "Best Practice in RSS Measurements and Ranging," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 4, pp. 2662–2686, 2016.
- [25] P. Gkotsiopoulos, D. Zorbas, and C. Douligeris, "Performance Determinants in LoRa Networks: A Literature Review," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 3, pp. 1721–1758, 2021.
- [26] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things," *Sensors*, vol. 16, no. 9, 2016.

- [27] E. Svertoka, A. Rusu-Casandra, R. Burget, I. Marghescu, J. Hosek, and A. Ometov, "LoRaWAN: Lost for Localization?," *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 23, pp. 23307–23319, 2022.
- [28] M. C. Bor, U. Roedig, T. Voigt, and J. M. Alonso, "Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?," MSWiM '16, (New York, NY, USA), p. 59–67, Association for Computing Machinery, 2016.
- [29] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen, and M. Pettissalo, "On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology," in *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, pp. 55–59, 2015.
- [30] P. Tuset-Peiró, R. D. Gomes, P. Thubert, E. Cuerva, E. Egusquiza, and X. Vilajosana, "A Dataset to Evaluate IEEE 802.15.4g SUN for Dependable Low-Power Wireless Communications in Industrial Scenarios," *Data*, vol. 5, no. 3, 2020.
- [31] I. Constandache, S. Gaonkar, M. Saylor, R. R. Choudhury, and L. Cox, "EnLoc: Energy-Efficient Localization for Mobile Phones," in *IEEE INFOCOM 2009*, pp. 2716–2720, 2009.