



## Trabajo Fin de Grado

### **Análisis de la viabilidad de la utilización de gateways móviles en redes LoRa**

Analysis of the feasibility of using mobile gateways  
in LoRa networks

Autor

Miguel Ángel Lanau Murillo

Directores

Dra. D.<sup>a</sup> Piedad Garrido Picazo  
Dr. D. Julio A. Sangüesa Escorihuela

Escuela Universitaria Politécnica de Teruel  
2021



## RESUMEN

El objetivo de este TFG consiste en realizar un análisis exhaustivo sobre el uso de las redes LoRa incluyendo movilidad del Gateway. Para ello se emplearán las versiones más actualizadas del software necesario: OMNeT++ 6, INET 4.3 y FLoRa 1.0. Por lo tanto, el principal problema a abordar radica en incluir movilidad al Gateway.

La simulación de los distintos modelados de redes LoRaWan, se suele llevar a cabo mediante un framework de simulación denominado FLoRa (Framework for LORA). La propuesta de inclusión de movilidad, llevada a cabo en este TFG, supone una mejora notable a la hora de realizar las simulaciones respecto a la versión anterior de FLoRa, ya que se han añadido nuevas funcionalidades, librerías e información aportada por los resultados de éstas.

Se analizarán varias simulaciones en las que se monitorizarán los múltiples parámetros de los nodos y el Gateway (consumo, packetErrorRate...), adquiriendo información de las características que se deberían cumplir para que las comunicaciones sean eficientes. De esta forma, se espera que los resultados previstos, con movilidad, aporten una mejora en los resultados obtenidos respecto a un Gateway estático, en determinadas situaciones.

## PALABRAS CLAVE

LoRa, LoRaWAN, Internet de las cosas (IoT), Gateway, FLoRa (Framework for LoRa).

## TABLA DE CONTENIDOS

1. MARCO CONCEPTUAL .....	1
2. INTRODUCCIÓN y OBJETIVOS .....	4
3. ESTADO DEL ARTE.....	5
3.1 APLICACIONES Y CASOS DE USO.....	5
3.1.1 AGRICULTURA Y GANADERÍA .....	5
3.1.2 CONSTRUCCIONES .....	6
3.1.3 SMART CITIES.....	6
3.1.4 INDUSTRIA .....	7
3.1.5 LOGÍSTICA .....	7
3.1.6 SERVICIOS PÚBLICOS Y MEDICIÓN .....	7
3.2 ENFOQUE ACADÉMICO.....	8
4. PROPUESTA.....	10
4.1 SIMULACIONES INICIALES .....	10
4.1.1 Tecnologías empleadas .....	10
4.1.2 Integración de la movilidad sobre los componentes .....	13
4.1.3 Simulaciones y resultados .....	18
4.2 SIMULACIÓN DEL DESPLIGUE REAL .....	23
4.2.1 Simulaciones del despliegue real sin movilidad del Gateway.....	25
4.2.2 Simulación del despliegue real con movilidad del Gateway .....	27
4.2.3 Análisis de rendimiento .....	35
5. CONCLUSIONES .....	38
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	39

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Áreas de aplicación .....	5
Ilustración 2. Diagrama del escenario con nodo móvil.....	9
Ilustración 3. Diagrama de tecnologías utilizadas.....	12
Ilustración 4. Parámetros de los nodos LoRa.....	14
Ilustración 5. Parámetros del LoRaGW .....	14
Ilustración 6. Formato fichero NS2.....	16
Ilustración 7. Formato fichero BonnMotion.....	17
Ilustración 8. Configuración del parámetro movilidad en el gateway .....	17
Ilustración 9. Ejemplo de tracefile .....	17
Ilustración 10. Escenario de la simulación a 500m .....	18
Ilustración 11. Ejemplo de ejecución del script. ....	22
Ilustración 12. Escenario del despliegue real. ....	23
Ilustración 13. Imagen satélite del despliegue real .....	24
Ilustración 14. Escenario de la simulación del despliegue real. ....	24
Ilustración 15. Comparación entorno real vs simulado.....	26
Ilustración 16. Ruta del Gateway móvil en el despliegue simulado .....	27
Ilustración 17. Comparación de simulaciones con/sin movilidad y SF 7 .....	28
Ilustración 18. Comparación de simulaciones con/sin movilidad y SF 12 .....	28
Ilustración 19. Hexacóptero con Gateway LoRa integrado (elaboración propia) .....	30
Ilustración 20. Despliegue de hexacóptero con Gateway LoRa integrado (elaboración propia) .....	30
Ilustración 21. Comparación despliegue real con dron vs sin dron.....	31
Ilustración 22. Módulo IoT LoRa ESP32 OLED WiFi SX1276 con antena.....	32
Ilustración 23. Raspberry Pi 3 Model B.....	33
Ilustración 24. RAK 2245.....	33
Ilustración 25. Parámetros air-time calculator .....	35

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Configuración de las simulaciones realizadas .....	19
Tabla 2. Tabla simulación 1.....	19
Tabla 3. Tabla simulación 2.....	20
Tabla 4. Tabla simulación 3.....	20
Tabla 5. Tabla simulación 4.....	20
Tabla 6. Tabla simulación 5.....	20
Tabla 7. Tabla simulación 6.....	21
Tabla 8. Configuraciones empleadas para las simulaciones.....	24
Tabla 9. Resultados simulación 1 del despliegue. ....	25
Tabla 10. Resultados simulación 2 del despliegue .....	25
Tabla 11. Resultados del despliegue real estático. ....	26
Tabla 12. Resultados con Gateway móvil de la simulación 1 .....	27
Tabla 13. Resultados con Gateway móvil de la simulación 2.....	28
Tabla 14. Resultados simulación real móvil .....	31
Tabla 15. Características Módulo IoT LoRa ESP32.....	32
Tabla 16. Tabla de análisis de rendimiento del bitrate. ....	36
Tabla 17. Tabla de análisis de rendimiento del time on air. ....	36
Tabla 18. Tabla de análisis de rendimiento de los consumos.....	36
Tabla 19. Tabla de análisis de rendimiento de la utilización del canal del Gateway .....	37

## 1. MARCO CONCEPTUAL

La sociedad actual tiene la necesidad de conectar a Internet objetos cotidianos a través de dispositivos integrados, la comunicación perfecta entre personas, procesos y cosas es posible [48].

De aquí nace el internet de las cosas o Internet of Things (IoT). La definición de IoT podría ser la agrupación e interconexión de dispositivos y objetos a través de una red (bien sea privada o Internet, la red de redes), dónde todos ellos podrían ser visibles e interaccionar. Respecto al tipo de objetos o dispositivos podrían ser cualquiera, desde sensores y dispositivos mecánicos hasta objetos cotidianos como pueden ser el frigorífico, el calzado o la ropa [32].

El IoT ha llegado con una promesa muy creíble para los trabajadores y todas las personas. Gracias a la automatización de las tareas, aumentará la productividad de las empresas, por lo que la realización de las labores será mucho más sencilla. Otros factores del ecosistema también están funcionando favorablemente, como la evolución de dispositivos asequibles, el crecimiento inevitable de Internet y las telecomunicaciones, la implementación continua de análisis de datos y la llegada de máquinas inteligentes [30].

Esto incrementa el interés por diferentes tecnologías inalámbricas. Como se ha comentado antes muchas de las aplicaciones IoT integran redes de sensores inalámbricas, también conocidas como Wireless Sensor Network (WSN). Estas redes están formadas por un grupo de sensores autónomos especialmente distribuidos para monitorizar condiciones físicas o ambientales, como pueden ser la temperatura, sonidos, presión, etc. De esta forma se consigue recoger, procesar, analizar y transmitir información del entorno [33].

Las características principales que suelen tener este tipo de redes son su bajo consumo y su amplio rango de alcance. La tecnología de comunicación inalámbrica perfecta para estos casos son las redes LPWAN (Low Power Wide Area Networks). Permiten transmitir datos entre un dispositivo y una estación base/Gateway separados a distancias de incluso unos pocos kilómetros con un consumo energético muy reducido [6].

Dentro de estas redes se encuentra la especificación LoRaWAN. El estándar LoRaWAN apunta requerimientos del IoT, tales como conexiones bidireccionales seguras, bajo consumo de energía, largo alcance de comunicación, bajas velocidades de datos, baja frecuencia de transmisión, movilidad y servicios de localización [23].

Se detallará más adelante la especificación de dicha red, pero para tener unos conceptos básicos de ésta, se basa en una estructura que suele contar con una serie de nodos, gateways, servidor de red y aplicaciones. Los nodos recolectan información, la cual es enviada al Gateway a través de ondas de radio y éste las transfiere al servidor mediante internet. Luego el usuario puede consultar la información mediante una aplicación, la cual estará relacionada con el servidor.

Como se ha comentado antes, en la sociedad actual, existe una necesidad de medir todos los datos posibles, que los usuarios sean capaces de procesarlos y sacarles rentabilidad. Esto tiene como objetivo principal mejorar la calidad de vida de las personas (Quality of Life).

En otras palabras, la calidad de vida son una serie de condiciones de las que debe gozar un individuo para poder satisfacer sus necesidades. De modo que no solo sobreviva, sino que viva con comodidad. La calidad de vida abarca diversos aspectos subjetivos, pero una forma de medirla es mediante el Índice de Desarrollo Humano (IDH). Éste es un indicador nacido de la mano del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) que mide el desarrollo de cada país atendiendo a variables como la esperanza de vida, la educación o el ingreso per cápita [46].

Si se centra la atención en el uso de las redes LoRa para el cumplimiento de estos objetivos, según los desarrolladores de esta tecnología el alcance de estas redes en condiciones óptimas puede llegar a ser de hasta 15 kilómetros, siendo menores las prestaciones en entornos urbanos densos, dando unas distancias máximas de 5 kilómetros.

En lo que respecta a la vida útil de la batería, la energía necesaria para transmitir un paquete de datos es mínima, dado que los paquetes de datos son muy pequeños y sólo se transmiten unas pocas veces al día. Además, cuando los dispositivos finales están inactivos, el consumo de energía se mide en milivatios (mW), lo que permite que la batería de un dispositivo dure muchos, muchos años.

Cuando se trata de capacidad, una red LoRaWAN puede admitir millones de mensajes. Sin embargo, la cantidad de mensajes admitidos en una implementación determinada depende de la cantidad de puertas de enlace instaladas. Una sola puerta de enlace de ocho canales puede admitir algunos cientos de miles de mensajes en el transcurso de un período de 24 horas. Si cada dispositivo final envía 10 mensajes al día, dicha puerta de enlace puede admitir alrededor de 10,000 dispositivos. Si la red incluye 10 de estas puertas de enlace, la red puede admitir aproximadamente 100.000 dispositivos y un millón de mensajes. Si se requiere más capacidad, todo lo que se necesita es agregar puertas de enlace adicionales a la red.

Y luego, está el costo. Dadas las capacidades de los nodos finales y las puertas de enlace basados en LoRa, solo unas pocas puertas de enlace, configuradas en una red en estrella, son necesarias para dar servicio a una multitud de nodos finales. Esto significa que los gastos de capital y operativos pueden mantenerse relativamente bajos. Además, cuando los módulos LoRa rentables que están integrados en nodos finales económicos se utilizan junto con el estándar abierto LoRaWAN, el retorno de la inversión puede ser considerable [22].

Dejando a un lado las redes inalámbricas, otras de las tecnologías actuales que pueden ser muy útiles a la hora de mejorar la productividad en áreas como pueden ser la agrícola son los drones. Contra más grandes son los terrenos, más necesario se hace el monitoreo de estos, sin embargo, también conlleva un incremento de la dificultad a la hora de realizar estas tareas.

Como se ha comentado antes, la distancia entre los nodos y el Gateway en las redes LoRa es limitada, por lo tanto, incluir drones en este tipo de redes puede ser una solución muy interesante.

## 2. INTRODUCCIÓN y OBJETIVOS

La idea de este trabajo surgió a partir del TFG realizado por Natalia Torres [25]. En este se vio la utilidad y potencial de las redes LoRa, es por esto por lo que surgió la motivación para indagar más sobre estas y desarrollar mejoras que puedan llegar a ser de utilidad en el mundo real. La cuestión que motivó a la realización de este TFG fue “¿Qué mejoras se conseguirían si se añade movilidad sobre el Gateway?”.

El objetivo de este TFG es realizar un análisis exhaustivo sobre el uso de las redes LoRa incluyendo movilidad sobre el Gateway, de forma que los resultados previstos, aporten una mejora respecto a los resultados obtenidos en redes con un Gateway estático.

De esta forma se conseguirían aumentar las distancias de las áreas cubiertas por este tipo de redes, asegurando la llegada de los paquetes por parte de los diferentes nodos.

Para cumplir los objetivos planteados van a ser necesarios los siguientes pasos:

- Investigación y documentación sobre las distintas tecnologías.
- Implementación de la movilidad sobre los componentes necesarios en las simulaciones.
- Simulación de diferentes despliegues, tanto con movilidad, como sin ella.
- Llevar a cabo la recolecta de los datos sobre los diferentes escenarios simulados.
- Comparación de los datos respecto a un despliegue real.
- Realización de análisis de rendimiento.

Este documento se ha estructurado de la siguiente manera. En primer lugar, una introducción en la que se contextualiza el proyecto tanto a nivel teórico como a nivel tecnológico. Después, en el estado del arte se comentarán las soluciones tecnológicas que tienen las redes LoRaWAN sobre casos reales. Posteriormente, se planteará la propuesta a realizar y el desarrollo de ésta. En ella se realizarán las simulaciones de los despliegues que se llevarán a cabo en un entorno real y se compararán los resultados de ambos.

Este proyecto también tendrá en cuenta objetivos de desarrollo sostenible (ODS). El desarrollo sostenible es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones, garantizando el equilibrio entre el crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar social.

Este es un concepto que apareció por primera vez en 1987 con la publicación del Informe Brundtland, que alertaba de las consecuencias medioambientales negativas del desarrollo económico y la globalización y trataba de buscar posibles soluciones a los problemas derivados de la industrialización y el crecimiento de la población [31].

Por último, se incluye un apartado de referencias bibliográficas, para cuya representación y cita, se ha seguido la norma UNE-ISO 690.

### 3. ESTADO DEL ARTE

Este punto se va a dividir en dos apartados. El primero se centrará en mostrar las aplicaciones y casos de uso de esta tecnología. En cambio, el segundo comentará diferentes artículos relacionados con la propuesta, dándole un enfoque más académico.

#### 3.1 APlicaciones y Casos de uso

Este apartado se va a centrar en la presentación de las diferentes aplicaciones y casos de uso que tienen las soluciones LoRaWAN en todo el mundo [17]. Como se va a observar, las aplicaciones que tiene esta tecnología al mundo real son muy variadas y tienen una gran utilidad a la hora de optimizar y modernizar algunas áreas.



Ilustración 1. Áreas de aplicación

A continuación, tal y como se puede ver en la Ilustración 1, se va a comentar el uso de este tipo de redes en ámbitos como la agricultura, ganadería, construcciones, Smart cities, industria, logística o servicios públicos [24].

##### 3.1.1 AGRICULTURA Y GANADERÍA

Hoy en día, la mayoría de los trabajadores de este sector son conscientes de la creciente demanda de los consumidores. Los agricultores han aprovechado durante mucho tiempo los avances tecnológicos para adaptar las prácticas

agrícolas a los tiempos cambiantes, particularmente con el surgimiento de la agricultura inteligente [11].

Algunos de los usos que te ofrecen las soluciones LoRa son la vigilancia del ganado, el control de riego o simplemente el monitoreo de la salud del suelo.

Para esto bastaría con poner sensores en los terrenos o en los animales, y mientras estén a una distancia máxima de unos pocos kilómetros del Gateway, esto permitiría monitorear variables como pueden ser la temperatura corporal, el celo, enfermedades, humedad, temperatura, luminosidad, pérdida o robo de ganado, etc [19].

Ya hay diferentes casos de usos de diferentes empresas, como Pessl Instruments, la cual ha utilizado LoRaWAN para la optimización de su producción láctea. Esto se consigue con sensores de temperatura y humedad en los establos, midiendo de forma inmediata las condiciones ambientales, ya que está demostrado que las vacas son más productivas por debajo de los 18°C [35].

### 3.1.2 CONSTRUCCIONES

LoRaWAN ya se ha convertido en el protocolo favorito por las construcciones inteligentes al proporcionar conectividad de bajo consumo y largo alcance en implementaciones comerciales a gran escala [12].

Lora permite a los administradores de edificios, propietarios, inquilinos y proveedores de servicios ver las funciones del edificio de forma remota y garantizar que todas las cosas dentro del edificio funcionen correctamente.

Puede tener aplicaciones como seguridad o predicción de fallos. Para ello bastaría con monitorizar los sensores necesarios (detección de intrusos, trazabilidad de equipamiento local, medidores de fugas de agua, detectores de señales de fallos de potencia) [20].

La empresa Conserv and TEKTELIC colabora para proporcionar soluciones de monitoreo en interiores para proteger colecciones y objetos valiosos. Ofrece a sus clientes una solución LoRaWAN confiable para monitoreo y alertas de condiciones clave como la temperatura, humedad, luz y vibración en estos distintos entornos para garantizar que los objetos valiosos no sufran daños o averías [36].

### 3.1.3 SMART CITIES

Se utiliza para muchos temas diversos, aunque todos tienen el objetivo común de mejorar el rendimiento, optimizar los recursos, reducir los desperdicios, los costos y lo más importante, mejorar la calidad de vida de los ciudadanos [16].

Algunas ideas de uso son la gestión de estacionamientos, vigilancia del medio ambiente (contaminación del aire, agua...), seguridad, iluminación de las calles o gestión de residuos [44].

Como caso de uso se puede ver el de ThingPark China en Shanghái [37]. Se ha realizado un despliegue de 150.000 sensores, los cuales sirven para las siguientes aplicaciones:

1. Detectores de humo para dar avisos tempranos sobre incendios en bloques residenciales y oficinas.
2. Sensores de acidez y de oxígeno que controlan la contaminación del aire y la calidad del agua.
3. Detectores de ocupación de parkings.
4. Detectores de aperturas de tapas de alcantarilla para detectar y prevenir el acceso no autorizado.

### 3.1.4 INDUSTRIA

La industria 4.0 hace que las máquinas de fábrica, infraestructuras o sistemas de gestión estén cada vez más conectadas [15]. Los actores de la industria invierten cada vez más en soluciones innovadoras para optimizar las operaciones y administrar mejor los recursos, los equipos y la seguridad del personal y el medio ambiente [7].

La compañía Aloxy monitorea las posiciones de las válvulas con LoRaWAN para mejorar la seguridad y la eficiencia en la industria química y de procesos. Estas válvulas eran manuales y los empleados tenían que comprobar en cada momento su posición. Ahora un dispositivo inalámbrico está conectado al volante o palanca de la válvula y detecta la posición de ésta [38].

### 3.1.5 LOGÍSTICA

El seguimiento a tiempo real, transparente y fluido de los activos y la optimización de la logística y las cadenas de suministro han sido durante mucho tiempo el enfoque de algunas de las empresas más innovadoras de todo el mundo [14]. LoRaWAN está a punto de marcar el comienzo de una era completamente nueva de monitoreo de las cadenas de suministro de extremo a extremo a largas distancias a bajo costo [34].

Aloxy utiliza duchas y lavados de ojos de emergencia con LoRaWAN. Estas duchas y estaciones de lavados de ojos no se usan con regularidad, y, por lo tanto, la bacteria Legionela en el agua se multiplica. Es por esto por lo que se debe abrir al menos una vez a la semana para tomar medidas preventivas. Se emplean los sensores para ver si la posición de las válvulas de las duchas está abierta o cerrada, y de esta manera se puede realizar un historial de las veces que se han empleado estas estaciones [39].

### 3.1.6 SERVICIOS PÚBLICOS Y MEDICIÓN

Las empresas de servicios públicos de agua, electricidad, gas y calefacción se enfrentan al desafío de satisfacer una mayor demanda pública, aumentar la eficiencia y proporcionar servicios de alta calidad en áreas urbanas densas o rurales remotas [13] [21].

La empresa PVH ha mejorado su sistema de control de paneles solares en extensas “granjas de paneles solares” con LoRaWAN. Para el funcionamiento correcto de estas placas es necesario que tengan una correcta orientación hacia los rayos del sol a lo largo del día, además de detectar fuertes rachas de viento para protegerlos. Estas granjas suelen estar en lugares aislados donde la conectividad no está disponible, es por esto que las tecnologías LoRa son una solución perfecta para estos casos [40].

Viendo el panorama actual y los distintos usos que se le ha dado a esta tecnología, se ha llegado a la conclusión de que se pueden optimizar aun más estas conexiones, ya que tienen ciertas carencias a la hora de realizar las comunicaciones a largas distancias o en entorno en lo que haya muchos obstáculos de por medio. Se propone añadir la movilidad sobre el Gateway para mitigar estas debilidades, de forma que se puedan realizar despliegues en entornos más grandes o con más dificultades. En particular, se orientará hacia grandes áreas rurales, ya que en ellas se puede realizar el vuelo de drones sin la necesidad de tantos permisos legales, y de momento, es la forma planteada para conseguir esta movilidad.

## 3.2 ENFOQUE ACADÉMICO

Se ha realizado una búsqueda de diferentes artículos de investigación (IEEE Xplore y Springer) en los que también se utilicen redes LoRa añadiendo movilidad sobre sus componentes. Entre ellos se han encontrado los siguientes:

### *Measurement of Node Mobility for the LoRa Protocol [3]*

En este artículo se comenta la idea de que las tecnologías de la comunicación existentes para IoT no satisfacen las necesidades reales, con respecto a las largas distancias o bajos consumos de energía. Es por esto que se ha realizado un estudio sobre la movilidad para el protocolo LoRa. El artículo se basa en una breve descripción general del protocolo de la capa física, así como los resultados de algunos despliegues de pruebas realizado por las calles de Bucharest y sus alrededores.

La movilidad se aplica sobre los nodos, y se consigue colocando uno de ellos en un coche. En el trabajo se ha medido la llegada de paquetes y las prestaciones de la conexión para diferentes despliegues con el coche en movimiento.

### *Assesing the Impact of Mobility on LoRa Communications [2]*

En resumen, se comenta la existencia de una gran cantidad de trabajos de investigación en los que sus experimentos se han realizado en escenarios estáticos. Es por esto que se justifica la necesidad de realizar análisis sobre escenarios con movilidad. Esta movilidad es muy parecida al artículo anterior, ya que el Gateway es estático y lo que se mueven son los nodos. Para conseguir la movilidad de los nodos se ha utilizado un coche. Un diagrama del escenario realizado sería éste:



Ilustración 2. Diagrama del escenario con nodo móvil

*A study of the LoRa signal propagation in forest, urban, and suburban environments [9]*

El último artículo se centra en el estudio de las señales de propagación en entorno rurales, urbanos y suburbanos. Entre las pruebas realizadas se encuentran escenarios con movilidad en los nodos. La movilidad se ha conseguido llevando el nodo por una persona caminando por diferentes rutas, tanto urbanas, como rurales. Los resultados obtenidos a partir de las pruebas concluyen que se consigue hasta 10 veces más rango de alcance en entornos rurales que en escenarios urbanos.

En general, los estudios realizados se centran básicamente en realizar análisis de las prestaciones en entornos con movilidad, sin embargo, no se muestra en ningún momento intención de utilizar esta característica para mejorar las conexiones.

Además, en todos los artículos se aplica la movilidad sobre los nodos, no sobre el Gateway. Aplicar la movilidad sobre el Gateway puede resultar más útil a la hora de conseguir objetivos como mejorar la recepción de paquetes a largas distancias, ya que, de normal, los nodos van a ser sensores estáticos.

Otro factor a tener en cuenta es la forma de generar esta movilidad. Los métodos que se han comentado anteriormente tienen una gran facilidad a la hora de llevarse a cabo, sin embargo, son cerca del suelo. Si se utilizase otro dispositivo que permitiese a los componentes elevarse, se podría aumentar el rango de cobertura ya que se verían eliminados los obstáculos del terreno.

## 4. PROPUESTA

La propuesta que se va a llevar a cabo consiste en realizar mejoras sobre los resultados de las redes LoRa que dispongan de gateways estáticos. Esta mejora se va a buscar añadiendo movilidad sobre el Gateway. Esta movilidad se puede conseguir con la disposición de un dron capaz de realizar vuelos en los que en su ruta se acerque a los diferentes nodos de la red.

Las tareas previstas para llevar a cabo este objetivo son la realización de un análisis exhaustivo sobre despliegues simulados, tanto de entornos con el Gateway móvil como estático. A partir de aquí se sacarán las conclusiones pertinentes para llevar estas simulaciones a un entorno real, y de esta manera comparar los resultados obtenidos. Se tendrán en cuenta sobre todo la llegada de paquetes por parte de cada nodo de forma individual, asegurando que cada uno consiga enviar sus datos al menos una vez al Gateway a lo largo de la simulación.

### 4.1 SIMULACIONES INICIALES

Ahora que ya se han introducido lo que son las redes LoRa, se puede empezar el planteamiento para la demostración e implantación de esta mejora. El siguiente objetivo va a ser la obtención de los datos que se necesitan de diferentes simulaciones. Estas simulaciones van a ser tanto con el Gateway estático como dinámico. En cuanto se disponga de todos los datos necesarios de los entornos simulados, se valorará el hecho de que haya habido una mejora considerable, haciendo que llevar esta idea a pruebas reales tenga sentido.

#### 4.1.1 Tecnologías empleadas

Para la correcta configuración del entorno sobre la que se realizarán las simulaciones se va a emplear la última versión de éstas actualmente. Se hablará del uso de cada una y de la compatibilidad entre ellas, ya que, dependiendo de las versiones y la configuración de cada una, el funcionamiento global puede fallar. Las tecnologías principales empleadas son: Ubuntu, OMNeT++, INET y FLoRa.

##### Ubuntu

El sistema operativo sobre el que se ha realizado la instalación de todo el entorno ha sido Ubuntu 20.04.2 LTS (Long Time Support). Se ha optado por esta versión porque es una de las versiones más actuales, además de que ofrece soporte a largo plazo. También era la opción más recomendable a la hora de la instalación de las demás tecnologías.

También se ha instalado en el sistema la versión de Java JDK (Java Development Kit) 11, pues es un requisito fundamental para la ejecución del simulador.

##### OMNeT++

OMNeT++ es un simulador modular de eventos discretos de redes orientado a objetos, usado habitualmente para modelar el tráfico de redes de telecomunicaciones, protocolos, sistemas multiprocesadores y distribuidos,

validación de arquitecturas hardware, evaluación del rendimiento de sistemas software y, en general, conformar cualquier sistema que pueda simularse con eventos discretos [27].

OMNeT++ proporciona módulos que se programan en C++, luego se ensamblan en componentes más grandes utilizando un lenguaje de alto nivel, (Network Description Language o NED). La reutilización de modelos es gratuita y tiene un amplio soporte de GUI (Graphical User Interface) y, debido a su arquitectura modular, el kernel de simulación se puede integrar fácilmente en sus aplicaciones [47].

Los componentes principales de OMNeT++ son los siguientes:

5. Biblioteca del kernel de simulación (C++).
6. El lenguaje de descripción de topología NED.
7. IDE (Integrated Development Environment) de simulación basado en la plataforma Eclipse.
8. GUI de tiempo de ejecución de simulación interactiva (Qtenv).
9. Interfaz de línea de comandos para la ejecución de la simulación (Cmdenv).
10. Utilidades (herramientas de creación de archivos MAKE, etc.).
11. Documentación, simulaciones de muestra, etc.

Se ha optado por utilizar la versión OMNeT ++ 6.0 Preview 10 [28]. Esto es debido a que es la más reciente y permite el uso de la biblioteca estándar de OMNeT++, INET Framework 4.3. Además, la mejora de funcionalidades y de prestaciones sobre sus versiones anteriores 5.X es considerable.

## INET

INET Framework es una biblioteca de modelos de código abierto para el entorno de simulación OMNeT++. Proporciona protocolos, agentes y otros modelos para investigadores y estudiantes que trabajan con redes de comunicación. INET es especialmente útil al diseñar y validar protocolos o explorar escenarios nuevos [18]. La versión elegida es INET Framework 4.3, esto es debido a que es la más reciente y permitirá utilizar la última actualización de la siguiente tecnología a emplear.

INET debe instalarse al configurar OMNet++ y se puede instalar automáticamente al iniciar éste por primera vez. Para realizar las instalación y configuración correcta de estos dos últimos componentes hay que seguir el manual proporcionado en la propia página oficial de OMNet++ [29].

## FLoRa

FLoRa (Framework for LoRa) es un marco de simulación para redes LoRa. Se basa en el simulador de red OMNeT++ y también utiliza componentes del marco INET.

FLoRa permite la creación de redes LoRa con módulos para nodos LoRa, puertas de enlace (gateways) y un servidor de red. La lógica de la aplicación se puede implementar como módulos independientes que están conectados con el servidor de red. El servidor de red y los nodos admiten la gestión dinámica de los

parámetros de configuración. Finalmente, las estadísticas de consumo de energía se recopilan en cada nodo [10].

La versión elegida de FLoRa es la 1.0.0, es una actualización sobre las versiones anteriores y para su funcionamiento necesita como mínimo las versiones de INET 4.3 y de OMNeT++ 6.0.

Para aclarar este apartado se ha elaborado un diagrama [Ilustración 2] en el que se definen de una forma más visual la arquitectura de tecnologías empleada.

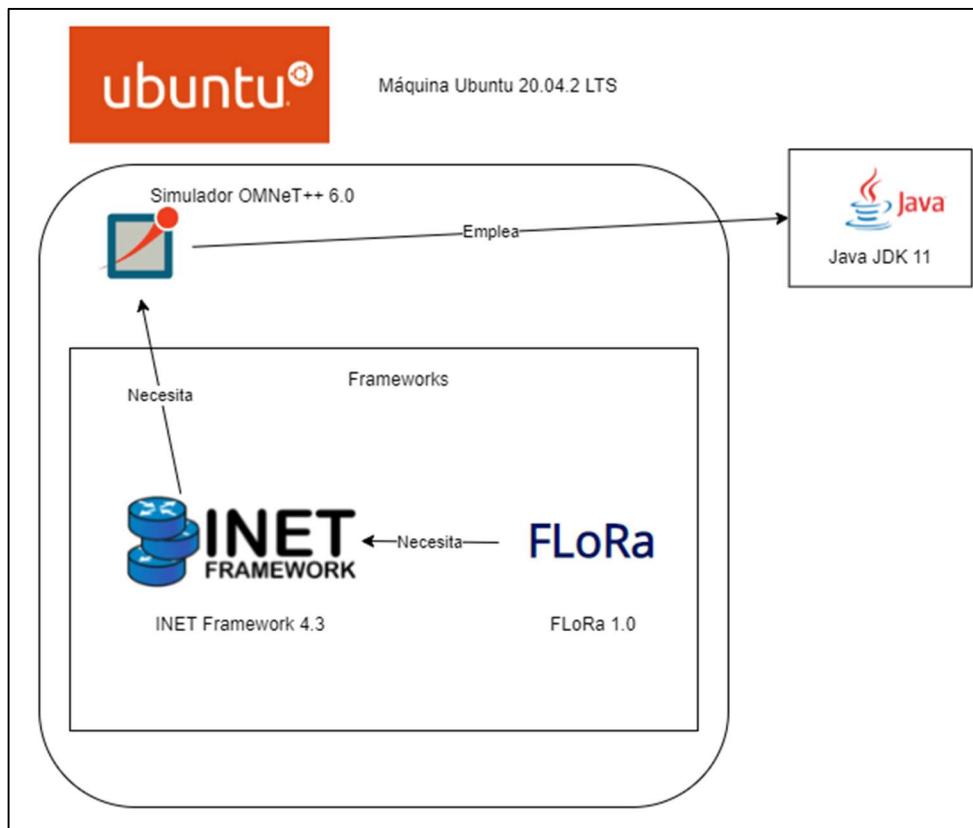


Ilustración 3. Diagrama de tecnologías utilizadas

Un punto a favor de este trabajo es la interoperabilidad entre las diferentes tecnologías. Ésta es una de las características recogidas en el modelo de calidad del producto definido por la ISO/IEC 25010.

El modelo de calidad representa la piedra angular en torno a la cual se establece el sistema para la evaluación de la calidad de un producto. En este modelo se determinan las características de calidad que se van a tener en cuenta a la hora de evaluar las propiedades de un producto software determinado.

La calidad del producto software se puede interpretar como el grado en que dicho producto satisface los requisitos de sus usuarios aportando de esta manera un valor. Son precisamente estos requisitos (funcionalidad, rendimiento,

seguridad, mantenibilidad, etc.) los que se encuentran representados en el modelo de calidad, el cual categoriza la calidad del producto en características y subcaracterísticas (ISO/IEC 25010) [8].

Una de las características que aseguran la calidad de un producto software es la compatibilidad. Esta es la capacidad de dos o más sistemas o componentes para intercambiar información y/o llevar a cabo las funciones requeridas cuando comparten el mismo entorno hardware o software. Esta característica se subdivide a su vez en la subcaracterística de interoperabilidad. La interoperabilidad asegura la capacidad de dos o más sistemas o componentes, para intercambiar información y utilizar la información intercambiada.

Una vez realizada toda la integración, finalmente, lo que interesa es realizar las simulaciones. Para poner en marcha un escenario, es decir, crear y configurar cómo sería el despliegue, ejecutarlo y visualizar los resultados, es necesario tener clara la estructura que sigue FLoRa.

La estructura de FLoRa se basa en dos tipos de ficheros. Por un lado los .ned, en los cuales se define el modelo de los diferentes componentes de la simulación. Por el otro los ficheros con extensión .ini, en estos se describen los parámetros y configuraciones que va a tener la simulación. Estas configuraciones se pueden modificar tanto gráficamente como por texto y permiten al usuario crear simulaciones a su gusto.

En este caso el reto principal ha sido añadir la movilidad sobre los componentes de la simulación. Para ello se han tenido que modificar los .ned de los nodos (aunque permanecerán estáticos en este caso) y el Gateway. A continuación, se muestra el procedimiento seguido.

#### 4.1.2 Integración de la movilidad sobre los componentes

Como se ha comentado, una de las partes principales de este trabajo es la movilidad del Gateway. Ésta es la razón por la que hay que encontrar la forma de integrarla sobre los componentes de las simulaciones.

Para conseguirlo se ha realizado un estudio de los ficheros .ned tanto de los nodos como del Gateway de las simulaciones LoRa. Al ver las fuentes de estos ficheros, se pueden identificar los diferentes submódulos que implementan, entre ellos se encuentra el de movilidad (ver ilustraciones 3 y 4).

```

package flora.LoraNode;

import inet.mobility.static.StationaryMobility;
import inet.networklayer.common.InterfaceTable;
import flora.LoRa.LoRaNic;
import flora.LoRaApp.SimpleLoRaApp;

module LoRaNode
{
    parameters:
        string deploymentType = default("");
        double maxGatewayDistance = default(320.0);
        double gatewayX = default(320.0);
        double gatewayY = default(320.0);
        @networkNode();
        *.interfaceTableModule = default(absPath(".interfaceTable"));
        @display("bgb=297,313;i=device/accesspoint;is=vs");
    submodules:
        interfaceTable: InterfaceTable {
            @display("p=30,26");
        }
        mobility: StationaryMobility {
            @display("p=24,88");
        }
    LoRaNic: LoRaNic {
        @display("p=137,239");
    }
    SimpleLoRaApp: SimpleLoRaApp {
        @display("p=137,32");
    }
    connections allowunconnected:
}

```

Ilustración 4. Parámetros de los nodos LoRa

```

module LoRaGW like INetworkNode
{
    parameters:
        @networkNode();
        *.interfaceTableModule = default(absPath(".interfaceTable"));
        *.routingTableModule = default(routingTableType != "" ? absPath(".routingTable") : "");
        *.energySourceModule = default(exists(energyStorage) ? absPath(".energyStorage") : "");

        int numEthInterfaces = default(0); // minimum number of ethernet interfaces
        int numWlanInterfaces = 1;

        bool hasIpv4 = default(true);
        string networkLayerType = default("Ipv4NetworkLayer");
        string routingTableType = default("Ipv4RoutingTable");
        int numUdpApps = default(0);
        bool hasUdp = default(firstAvailableOrEmpty("Udp") != "");
        string udpType = default(firstAvailableOrEmpty("UDP"));

        LoRaGWNic.radio.antenna.mobilityModule = default("^.^.^.mobility");

        *.mobilityModule = default(exists(mobility) ? absPath(".mobility") : "");

        @display("bgb=611,560;i=device/antennatower");
    gates:
        inout ethg[numEthInterfaces] @labels(EtherFrame-conn) @allowUnconnected;
        input radioIn[numWlanInterfaces] @directIn;

    submodules:
        interfaceTable: InterfaceTable {
            @display("p=30,26");
        }
        mobility: StationaryMobility {
            @display("p=24,88");
        }
    LoRaGWNic: LoRaGWNic {
        @display("p=163.56,367.728");
    }
    packetForwarder: PacketForwarder {
        @display("p=256.056,162.432;is=vl");
    }
    eth[sizeof(ethg)]: <default("EthernetInterface")> like IWiredInterface {
}

```

Ilustración 5. Parámetros del LoRaGW

Como se puede observar en las imágenes anteriores, por defecto los componentes tienen implementada la movilidad "StationaryMobility". Esta movilidad es estática, es decir, el objeto permanece en el mismo lugar a lo largo de toda la simulación.

Para la integración de estos submódulos hace falta importar las librerías correspondientes de INeT. En INeT se pueden encontrar una gran variedad de bibliotecas con distintos tipos de movilidad e incluso con ejemplos de éstas. Entre ellas se pueden observar diferentes tipos de modelos: estacionarios, deterministas, basados en trazas o estocásticos. [26].

### *Estacionarios*

Los modelos estacionarios solo definen una posición, pero no su movimiento.

- StationaryMobility: Determina una posición aleatoria.
- StaticGridMobility: Posiciona los elementos dentro de un rectángulo.
- StaticConcentricMobility: Posiciona los elementos dentro de un círculo.

### *Deterministas*

Estos modelos utilizan funciones matemáticas no aleatorias para definir el movimiento.

- LinearMobility: Mueve linealmente a velocidad constante un elemento.
- CircleMobility: Mueve alrededor de un círculo un elemento a velocidad constante.
- RectangleMobility: Movimiento rectangular a una velocidad constante.
- TractorMobility: Se mueve de forma similar a un tractor en un campo con un número de columnas.
- VehicleMobility: Se mueve de forma similar a un vehículo, especialmente a la hora de girar en las curvas.
- TurtleMobility: Se mueve de acuerdo a un script XML escrito en un lenguaje de programación simple, similar a LOGO.

### *Basados en trazas*

Los modelos de movilidad basados en trazas reproducen el movimiento grabado en un fichero con cierto formato.

- BonnMotionMobility: Reproduce la traza de un fichero con formato BonnMotion (Ver ilustración 6).
- Ns2MotionMobility: Los nodos se mueven de acuerdo a los ficheros de trazas usados en NS2 (Ver ilustración 5). NS2 es un simulador de redes de código abierto utilizado principalmente para investigación [42].

### *Estocásticos*

Utilizan modelos matemáticos en los que se incluyen números aleatorios.

- RandomWaypointMobility: Se mueve hasta un punto aleatorio con una velocidad aleatoria.

- GaussMarkovMobility: El modelo de Gauss-Markov contiene un parámetro de ajuste que controla la aleatoriedad en el movimiento del nodo.
- MassMobility: se mueve de forma similar a una masa con inercia y un momento.
- ChiangMobility: utiliza una matriz de transición probabilística para cambiar el estado de movimiento.

Después de haber analizado todos los tipos de movilidades disponibles se ha buscado cual es la mejor a la hora de perseguir el objetivo previsto.

Teniendo en cuenta un Gateway en movimiento, en entornos reales, podría ser un dron, sería interesante buscar una movilidad que sea compatible con un dispositivo de este tipo.

Una de las movilidades utilizadas por drones que están preparados para este tipo de despliegues son las que usan ficheros de trazas NS2. Sabiendo esto, sería una solución atractiva incluir comportamientos similares en las simulaciones.

Para que quede claro el funcionamiento de este tipo de movilidad, consiste en el movimiento de un objeto que está definido en un fichero de traza (trace file), en el cual se describen las coordenadas y el momento en el que debe estar el objeto en cualquier instante de la simulación.

Un ejemplo de estructura de NS2 trace file sería éste:

```
$node set X_ x1
$node set Y_ y1
$node set Z_ z1
$ns at $time $node setdest x2 y2 speed
$ns at $time $node set X_ x1
$ns at $time $node set Y_ Y1
$ns at $time $node set Z_ Z1
```

Ilustración 6. Formato fichero NS2

Como se puede observar, se define el objeto, momento y lugar del componente a lo largo de la ejecución.

Si se busca en los submódulos que aporta INet, se puede encontrar el paquete "NS2MotionMobility".

Después de integrarlo y crear el trace file correspondiente que se encargaba de definir la movilidad, la simulación no se ejecutaba correctamente, ya que se cortaba el envío de paquete en un cierto momento.

Es por esto por lo que se decidió buscar otra alternativa, el uso de "BonnMotionMobility".

Los fundamentos de este tipo de movilidad son los mismos, pero con la ventaja de que sus escenarios se pueden exportar a otro tipo de simulaciones que empleen por ejemplo los simuladores ns2, ns3, GloMoSim/Qualnet, COOJA, MiXiM y ONE [4].

La estructura del trace file para esta nueva movilidad es la siguiente:

```
// t1 x1 y1 t2 x2 y2 t3 x3 y3 t4 x4 y4 ...
//
// or
//
// t1 x1 y1 z1 t2 x2 y2 z2 t3 x3 y3 z3 t4 x4 y4 z4...
```

Ilustración 7. Formato fichero BonnMotion

El fichero es un texto plano, donde cada línea describe el movimiento de un objeto. Una línea consiste en una o más (t, x, y [z]) tuplas de números reales [5].

Se puede utilizar en entornos 2D y 3D. Para realizar simulaciones con la segunda opción simplemente es necesario poner a *True* el parámetro *is3D*.

A continuación, se muestran unas imágenes de cómo quedó el código y el trace file para las primeras simulaciones.

```
mobility: BonnMotionMobility {
    parameters:
        traceFile = "/home/miguel/Escritorio/BonnmotionGW
        is3D = true;
    @display("p=24,88");
}
```

Ilustración 8. Configuración del parámetro movilidad en el gateway

Se puede observar que se ha asignado un fichero al parámetro *tracefile* y se ha puesto a *True* el parámetro *is3D* para poder realizar simulaciones en entornos 3D.

```
1 0 10000 10000 2 250 10250 10000 2 500 10500 10000 2 750 11000 10000 2 1000 11250 10000 2
```

Ilustración 9. Ejemplo de tracefile

Aquí se puede observar cómo quedaría definido el movimiento del Gateway desde el instante 0 en la posición (10000, 10000, 2) hasta la posición (11250, 10000, 2) en el instante 1000.

Hay que aclarar que las unidades con las que se están trabajando son metros y segundos, es decir, en este ejemplo, el Gateway se habría desplazado 1250 metros a lo largo de 1000 segundos.

Una vez resuelto el problema de la movilidad sobre los componentes, se puede avanzar hasta el siguiente objetivo, las simulaciones.

#### 4.1.3 Simulaciones y resultados

Para empezar, se van a comentar los planteamientos realizados y la explicación de las simulaciones llevadas a cabo junto a los parámetros empleados. Como se verá más adelante, cobrarán una gran importancia los datos que serán recolectados de las diferentes simulaciones.

Lo primero de todo que se ha realizado son unas pequeñas simulaciones de prueba, en las que su objetivo principal es la comprobación de la correcta interoperabilidad del entorno y la adquisición de los conocimientos para ver qué datos recolectar y cómo.

##### Primeras simulaciones

Como se ha comentado, el único enfoque que tienen estas simulaciones es didáctico, por lo que sólo son una pasarela hacia las pruebas finales.

Las simulaciones realizadas se basan en componentes estáticos en los que el Gateway se encuentra a 100m, 1km y 5km de los nodos. Además, se analizarán con diferentes valores de los parámetros, en particular del spreading factor, transmisión power, coding rate y bandwidth (se comentarán más adelante).

Las simulaciones tienen este aspecto (Ilustración 7), simplemente se basan en un Gateway central rodeado de 4 nodos, todos a la misma distancia.

En esta imagen en particular, se muestra la simulación en la que los nodos están a 500m de distancia.

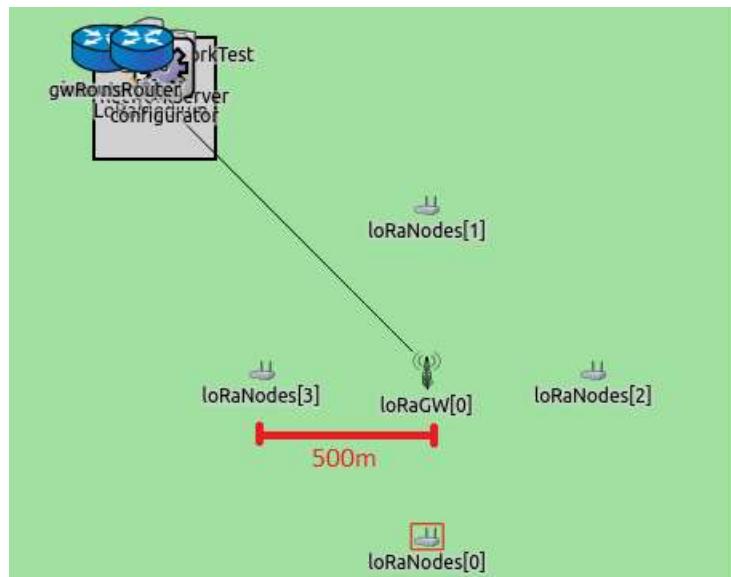


Ilustración 10. Escenario de la simulación a 500m

El valor de los parámetros utilizados son los siguientes:

Simulación	Distancia	SF	TP (dBm)	CR	BW (Khz)
1	100m	7	20	4	125
2		12	20	4	125
3	1Km	7	20	4	125
4		12	20	4	125
5	5Km	7	20	4	125
6		12	20	4	125

Tabla 1. Configuración de las simulaciones realizadas

Las iniciales de las columnas tienen el siguiente significado:

- **SF (Spreading Factor):** Define el tiempo que está la señal de radio en el aire. A mayor valor, mayor rango de cobertura, sin embargo, la velocidad de datos es menor y el consumo aumenta.
- **TP (Transmission Power):** Establece la intensidad de transmisión que utilizan los nodos. A mayor TP, mayor área de cobertura.
- **CR (Coding Rate):** Proporciona seguridad contra interferencias, a mayor valor, mayor protección. El CR es proporcional a la velocidad de transmisión e inversamente proporcional al tiempo en el aire o time on-air (ToA). [1]
- **BW (BandWidth):** Esto define el ancho de banda. A más BW, más velocidad de transmisión.

Los nodos de la simulación enviarán 5 paquetes cada uno a lo largo de la ejecución, en total 20.

Sabiendo esto, se puede continuar hacia los resultados de las seis simulaciones:

Simulación 1				
	Recibidos correctamente	No recibidos	No recibidos por interferencias	Ignorados
Node[0]	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[1]	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[2]	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[3]	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Total	20 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)

Tabla 2. Tabla simulación 1.

Simulación 2				
	Recibidos correctamente	No recibidos	No recibidos por interferencias	Ignorados
Node[0]	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[1]	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[2]	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[3]	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Total	20 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)

Tabla 3. Tabla simulación 2.

Simulación 3				
	Recibidos correctamente	No recibidos	No recibidos por interferencias	Ignorados
Node[0]	0 (0%)	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[1]	0 (0%)	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[2]	0 (0%)	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[3]	0 (0%)	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)
Total	0 (0%)	20 (100%)	0 (0%)	0 (0%)

Tabla 4. Tabla simulación 3.

Simulación 4				
	Recibidos correctamente	No recibidos	No recibidos por interferencias	Ignorados
Node[0]	3 (60%)	2 (40%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[1]	3 (60%)	2 (40%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[2]	0 (0%)	2 (40%)	0 (0%)	3 (60%)
Node[3]	2 (40%)	3 (60%)	0 (0%)	0 (0%)
Total	8 (40%)	9 (45%)	0 (0%)	3 (15%)

Tabla 5. Tabla simulación 4.

Simulación 5				
	Recibidos correctamente	No recibidos	No recibidos por interferencias	Ignorados
Node[0]	0 (0%)	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[1]	0 (0%)	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[2]	0 (0%)	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[3]	0 (0%)	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)
Total	0 (0%)	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)

Tabla 6. Tabla simulación 5.

Simulación 6				
	Recibidos correctamente	No recibidos	No recibidos por interferencias	Ignorados
Node[0]	0 (0%)	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[1]	0 (0%)	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[2]	0 (0%)	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[3]	0 (0%)	5 (100%)	0 (0%)	0 (0%)
Total	0 (0%)	20 (100%)	0 (0%)	0 (0%)

Tabla 7. Tabla simulación 6.

Los paquetes enviados pueden tener diferentes resultados:

- **Recibidos correctamente:** El paquete ha llegado satisfactoriamente.
- **No recibidos:** El paquete no ha llegado por causas no especificadas, probablemente por distancia.
- **No recibidos por interferencias:** Se ha generado una interferencia que ha impedido la llegada del paquete.
- **Ignorados:** LoRa utiliza un código de detección de errores llamado verificación por redundancia cíclica (CRC) [45]. Esto es utilizado frecuentemente en redes digitales y en dispositivos de almacenamiento para detectar cambios accidentales en los datos. Es decir, que LoRa ignora el paquete si detecta que está corrupto o es redundante.

Como se puede intuir, la recolección de los resultados está muy enfocada a la llegada de paquetes en función de las distancias de los nodos al Gateway.

En las simulaciones 1 y 2, la llegada de los paquetes es del 100%. De aquí se puede deducir que independientemente del SF que se utilice (siempre que esté por encima de 7), se va a conseguir recibir todos los paquetes enviados. Esto es interesante saberlo ya que, más adelante, cuando se hagan simulaciones con el Gateway móvil se podrá utilizar este dato para el diseño de éstas.

Continuando con las simulaciones 3 y 4, las cuales ya constan de distancias de 1 Km, se puede observar que ya empiezan a existir dificultades con la llegada de paquetes. Con SF 7 no se consigue enviar ninguno, sin embargo, con valor 12 se consiguen unas tasas de éxito del 40%. En estas dos simulaciones se puede observar perfectamente la influencia del SF, que como se ha comentado antes, a mayor valor, mayor rango de cobertura.

Para terminar, se han realizado las simulaciones 5 y 6, las cuales tienen una distancia de 5 Km entre los nodos y el Gateway. En ellas no se ha conseguido enviar ningún paquete correctamente, dado que las distancias son muy grandes.

OMNeT++ genera automáticamente un fichero de resultados desde el que se puede acceder a una gran cantidad de información relacionada con la simulación. Sin embargo, no incluye información individual a nivel de nodo, sobre la llegada de los paquetes enviados a lo largo de la misma.

Es por esto por lo que se ha tenido que buscar una nueva forma de adquirir esta información. La solución está en la terminal del simulador, ya que en ella se imprime en tiempo real todo lo que va ocurriendo en ésta, incluyendo los resultados del envío de cada paquete.

El simulador, al terminar, imprime miles de líneas de información, por lo que recopilarla a mano es una tarea demasiado laboriosa.

La solución propuesta es almacenar la información impresa por la terminal en un fichero de texto plano, que será parseado por un pequeño script realizado en Python.

Este script recoge todos los datos mostrados anteriormente y los imprime en un fichero .csv. Las siglas CSV vienen del inglés "Comma Separated Values" y significan valores separados por comas. Dicho esto, un archivo CSV es cualquier archivo de texto en el cual los caracteres están separados por comas, haciendo una especie de tabla en filas y columnas.

Este formato permite la manipulación de los datos como una simple hoja de cálculo. Programas como Excel pueden abrir e interpretar este tipo de ficheros.

Para el desarrollo del script se ha utilizado la biblioteca de Python "csv", la cual permite trabajar sobre ficheros .csv.

Para la ejecución del script simplemente hacen falta los siguientes parámetros:

1. Ruta de los resultados de la simulación.
2. Número de nodos empleados en la simulación.

```
:$ python3 parser.py simulaciones/simulacion500m_12sf.txt 4
```

Ilustración 11. Ejemplo de ejecución del script.

## 4.2 SIMULACIÓN DEL DESPLIGUE REAL

Ahora que ya se tiene un cierto manejo del simulador, y se dispone de los conocimientos y herramientas necesarios para la obtención de resultados, se va a llevar cabo el diseño de un nuevo despliegue más cercano a la realidad.

A continuación, se muestra una imagen del escenario:

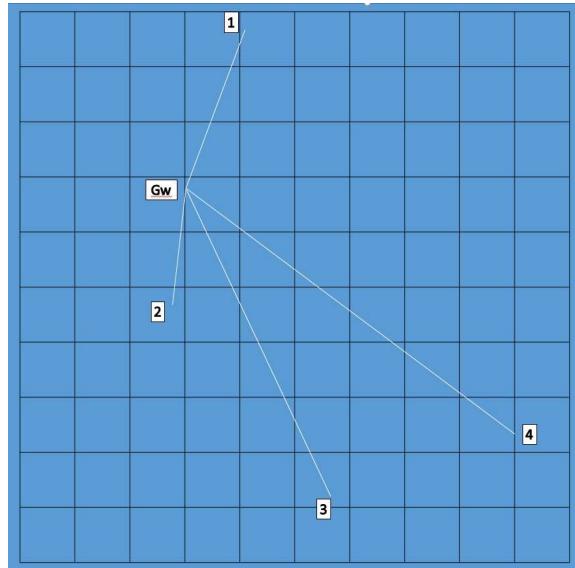


Ilustración 12. Escenario del despliegue real.

Como se puede observar, consta de un Gateway y cuatro nodos a diferentes distancias.

Las distancias de los nodos al Gateway son las siguientes:

1. 250m.
2. 180m.
3. 515m.
4. 615m.

Y al ser un entorno en tres dimensiones, éstas son las alturas a la que se encuentran los diferentes componentes sobre el nivel del mar:

1. 1309m.
2. 1308m.
3. 1286m.
4. 1340m.
5. Gateway (1294m).

Todos los componentes se encuentran a 2 metros sobre el nivel del suelo, ya que en pasadas simulaciones se vio que el estar al nivel del suelo afectaba a los resultados de éstas.

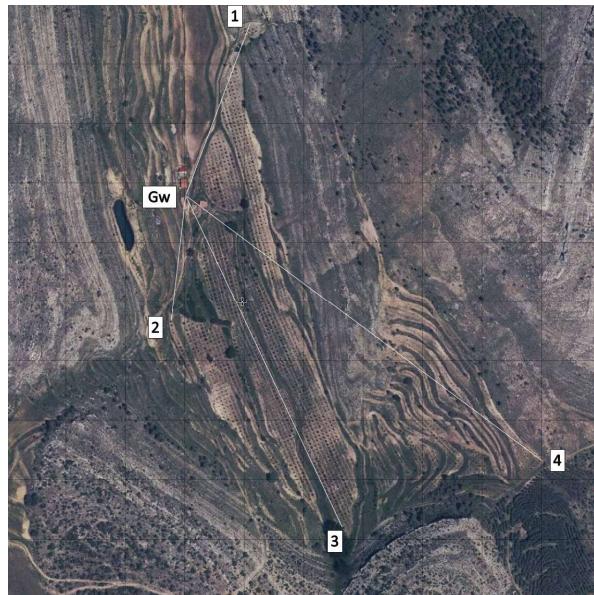


Ilustración 13. Imagen satélite del despliegue real

En el simulador el despliegue quedaría tal que así:

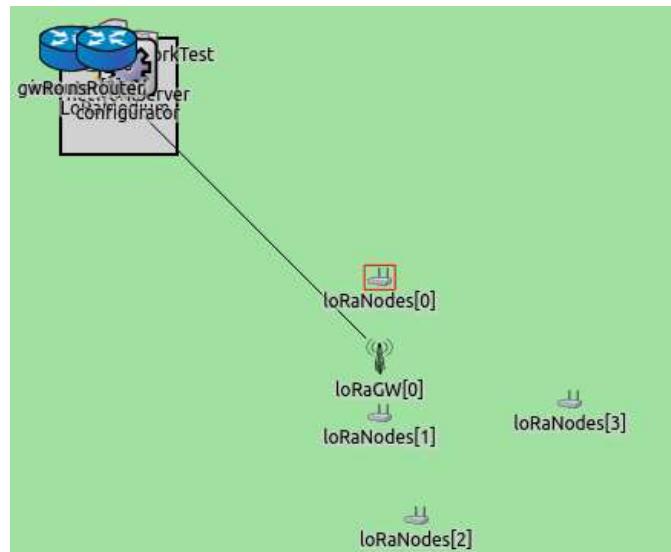


Ilustración 14. Escenario de la simulación del despliegue real.

Los parámetros a utilizar son los siguientes:

Simulación	SF	TP (dBm)	CR	BW (Khz)
1	12	20	4	125
2	7	20	4	125

Tabla 8. Configuraciones empleadas para las simulaciones

#### 4.2.1 Simulaciones del despliegue real sin movilidad del Gateway

Una vez realizada la simulación, se obtuvieron estos resultados:

Simulación 1				
	Recibidos correctamente	No recibidos	No recibidos por interferencias	Ignorados
Node[0]	27 (90%)	0 (0%)	3 (10%)	0 (0%)
Node[1]	30 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[2]	30 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[3]	25 (83%)	5 (17%)	0 (0%)	0 (0%)
Total	112 (93%)	5 (4%)	3 (3%)	0 (0%)

Tabla 9. Resultados simulación 1 del despliegue.

Como se puede observar, la llegada de los paquetes con el SF 12 a estas distancias no tiene mayor problema. Esto es debido principalmente al SF. Al tener este elevado valor la señal de radio está más tiempo en el aire, y por lo tanto el rango de cobertura es mayor. A pesar de no haber podido recibir un 7% de los paquetes ya sea o por interferencias, o por causas desconocidas, se puede considerar que esta configuración ha realizado una conexión óptima con los nodos.

En cambio, para la segunda simulación los resultados son los siguientes:

Simulación 2				
	Recibidos correctamente	No recibidos	No recibidos por interferencias	Ignorados
Node[0]	15 (50%)	15 (50%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[1]	27 (90%)	3 (10%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[2]	0 (0%)	30 (100%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[3]	0 (0%)	30 (100%)	0 (0%)	0 (0%)
Total	42 (35%)	78 (65%)	0 (0%)	0 (0%)

Tabla 10. Resultados simulación 2 del despliegue

Como era de esperar, al reducir el valor del SF también se verían perjudicados los resultados debido al rango de cobertura. En esta segunda simulación se han perdido un 65% de los paquetes enviados. Además, solo los dos nodos más cercanos han conseguido establecer conexión con el Gateway, ya que de los otros dos más lejanos no se ha recibido ningún paquete. Esto es un problema ya que ciertos nodos del despliegue se quedan incomunicados, y es algo que nunca debería ocurrir.

Ahora se va a realizar la comparación con el despliegue real utilizando SF 12. En ésta se han obtenido los siguientes resultados:

Simulación real estática		
	Recibidos correctamente	No recibidos
Node[0]	17 (57%)	13 (43%)
Node[1]	20 (67%)	10 (33%)
Node[2]	18 (60%)	12 (40%)
Node[3]	17 (57%)	13 (43%)
	72 (60%)	48 (40%)

Tabla 11. Resultados del despliegue real estático.

En la ilustración 13, se pueden ver una pequeña comparación del porcentaje de paquetes recibidos correctamente por parte de cada nodo tanto del entorno real, como del simulado con SF 12.

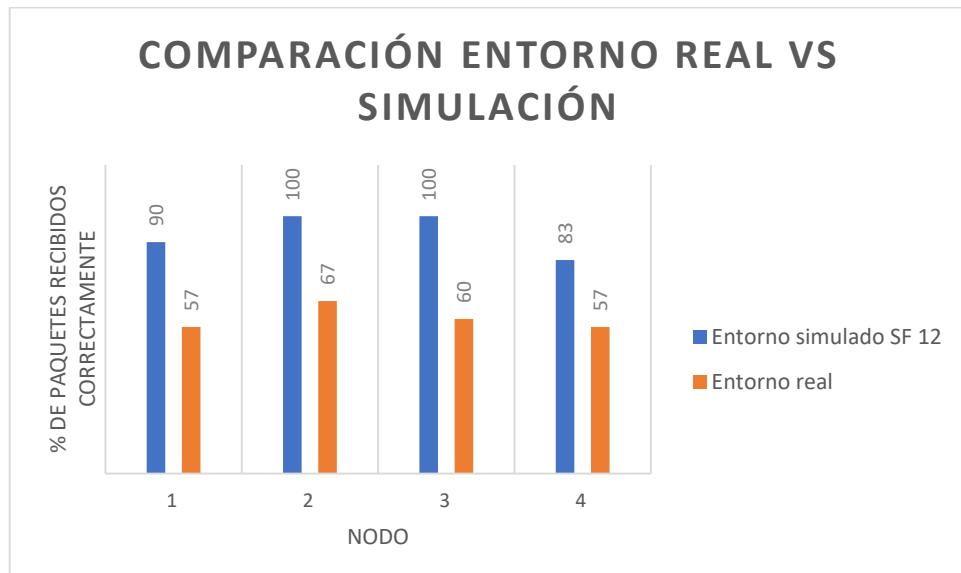


Ilustración 15. Comparación entorno real vs simulado

Como se ha comentado anteriormente, siendo 30 el número de paquetes enviados por nodo, en la gráfica anterior se puede observar que la recepción correcta de los paquetes por parte del entorno simulado no baja del 83%, mientras que en el entorno real este valor ha llegado hasta el 57%.

La tendencia de los paquetes recibidos correctamente por nodo es compartida por ambos entornos, sin embargo, los resultados del despliegue real son algo peores que en el simulado, esto puede ser debido a las condiciones del terreno o de interferencias que hayan aparecido.

A diferencia de la simulación no se puede saber con exactitud el motivo de las pérdidas de paquetes.

#### 4.2.2 Simulación del despliegue real con movilidad del Gateway

Teniendo en cuenta la simulación anterior y los resultados obtenidos, se va a buscar una mejora en la llegada de paquetes. Para ello se va a realizar la misma simulación, solo que el Gateway va a realizar una ruta en la que se acerque a 100 metros de cada nodo. De esta forma, se buscará que todos los nodos consigan enviar al menos un paquete correctamente a lo largo de la simulación, haciendo de esta manera que no queden incomunicados por las largas distancias.

La ruta se hará desde los nodos más cercanos hasta los más lejanos, en este orden: node[1], node[0], node[3], node[2].

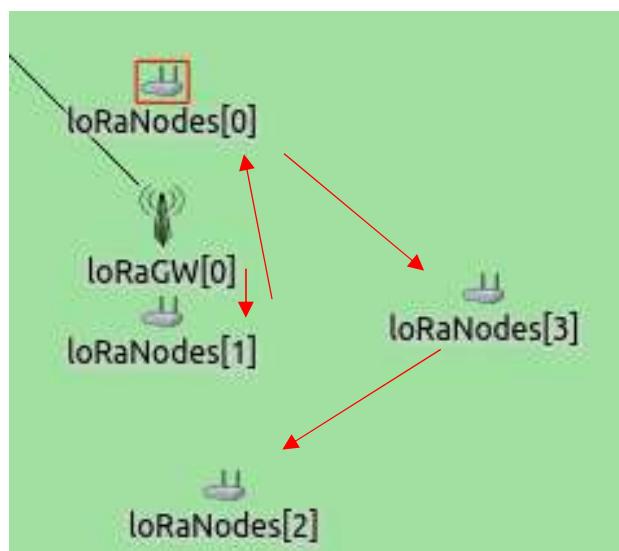


Ilustración 16. Ruta del Gateway móvil en el despliegue simulado

Siendo los parámetros utilizados para ambas simulaciones los mismos, los resultados han sido estos:

Simulación 1				
	Recibidos correctamente	No recibidos	No recibidos por interferencias	Ignorados
Node[0]	21 (70%)	1 (3%)	8 (27%)	0 (0%)
Node[1]	30 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[2]	28 (93%)	2 (7%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[3]	27 (90%)	3 (10%)	0 (0%)	0 (0%)
Total	106 (89%)	6 (5%)	8 (6%)	0 (0%)

Tabla 12. Resultados con Gateway móvil de la simulación 1

Simulación 2				
	Recibidos correctamente	No recibidos	No recibidos por interferencias	Ignorados
Node[0]	8 (27%)	22 (73%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[1]	20 (67%)	10 (33%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[2]	6 (20%)	24 (80%)	0 (0%)	0 (0%)
Node[3]	7 (23%)	23 (77%)	0 (0%)	0 (0%)
Total	41 (34%)	79 (66%)	0 (0%)	0 (0%)

Tabla 13. Resultados con Gateway móvil de la simulación 2

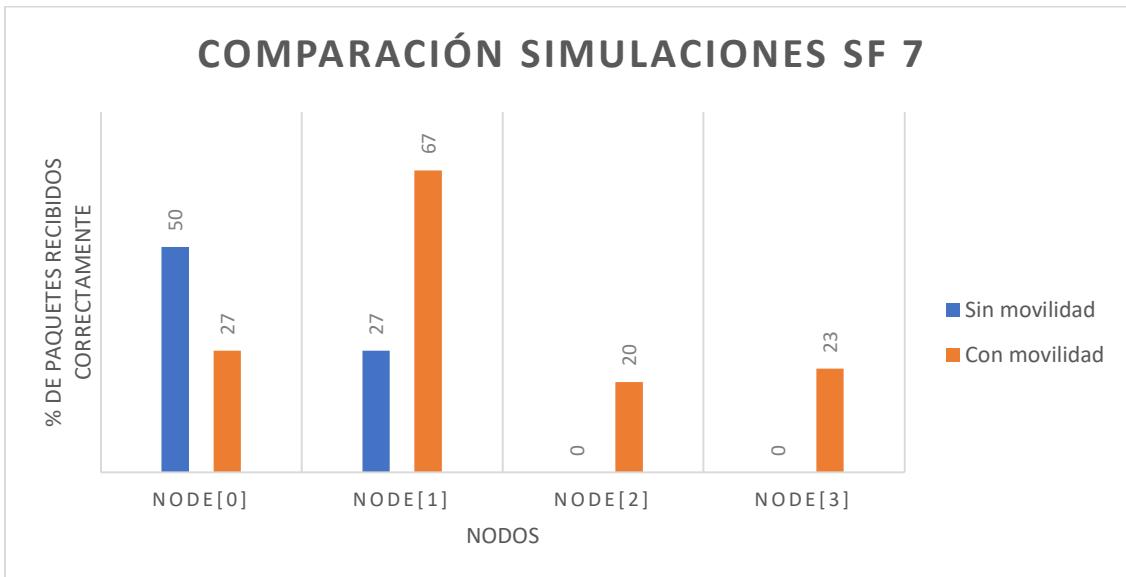


Ilustración 17. Comparación de simulaciones con/sin movilidad y SF 7

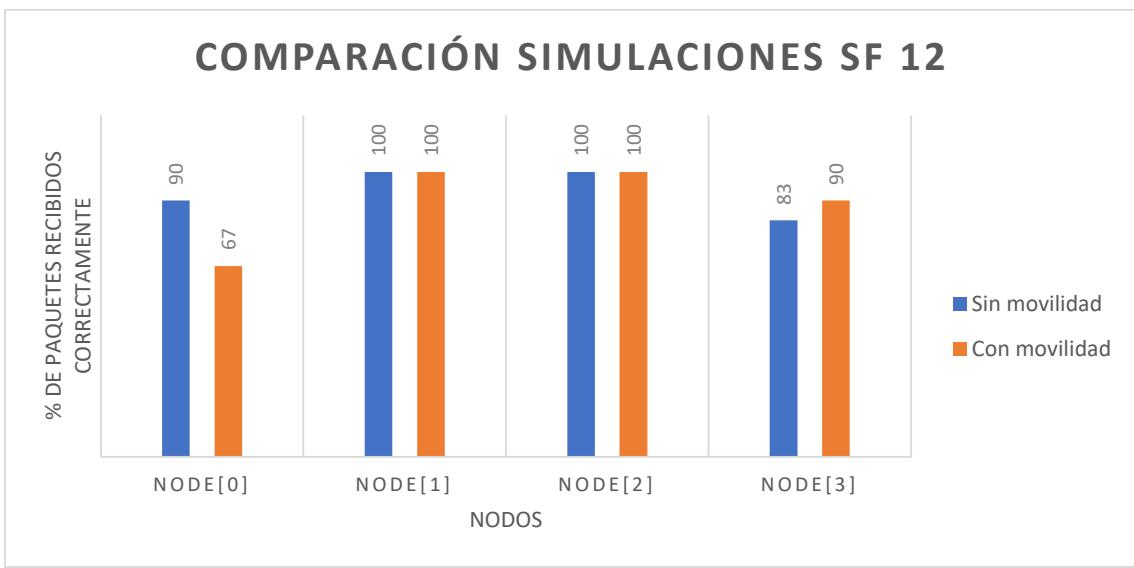


Ilustración 18. Comparación de simulaciones con/sin movilidad y SF 12

Prestando atención a los resultados, el total de paquetes enviados correctamente entre todos los nodos es similar, sin embargo, se ha conseguido distribuir más uniformemente esta llegada de paquetes entre los nodos.

Si se pone la mirada en las simulaciones con SF 7, la llegada de paquetes de los nodos más lejanos (tercer y cuarto nodo) no se llega a realizar en ningún momento del despliegue sin movilidad, sin embargo, al añadir movilidad, se consigue aumentar la llegada hasta un 20% y 23%.

En cambio, para las simulaciones con SF 12, no se ha encontrado prácticamente mejora. Esto es debido a que en la simulación sin movilidad ya disponía de un rango de cobertura suficiente como para realizar una conexión óptima. Se recuerda que el objetivo de añadir la movilidad es para subsanar los problemas que podían surgir de despliegues en los que los nodos estuviesen muy alejados del Gateway y no se pudiesen recibir correctamente los paquetes. Dicho esto, añadir movilidad sobre un despliegue que ya no tenía problemas para establecer estas comunicaciones, es normal que no muestre mejoras notables en los resultados de las simulaciones.

Una vez interpretados los datos de las simulaciones, los resultados esperados han sido satisfactorios, ya que se ha conseguido demostrar que es posible acabar con la incomunicación de los nodos que se encuentren demasiado alejados del Gateway.

De esta manera se termina el problema de los nodos provocado por su limitado rango de cobertura y se puede realizar una conexión correcta.

Debido a la dificultad y despliegue de medios necesarios para llevar una simulación con Gateway móvil a cabo, no se han podido realizar todas las simulaciones deseadas. Entre estas dificultades se encuentra el material necesario, presupuesto, meteorología, lugar e incluso aspectos legales de este.

Sin embargo, se ha conseguido llevar a cabo y recopilar datos de un despliegue con un dron, que, aunque no es una prueba dinámica como la idea propuesta, tiene otro enfoque y es igual de interesante.

Partiendo del entorno anteriormente mostrado, se ha elevado el Gateway a 50 metros del suelo con un dron. La idea de esto es eliminar posibles interferencias causadas por el relieve, buscando de esta manera una mejora en la llegada de paquetes.

El dron empleado ha sido el siguiente:



Ilustración 19. Hexacóptero con Gateway LoRa integrado (elaboración propia)



Ilustración 20. Despliegue de hexacóptero con Gateway LoRa integrado (elaboración propia)

Utilizando una configuración con SF 12 y realizando el mismo envío de paquetes que en las anteriores simulaciones se han obtenido los siguientes resultados:

Simulación real móvil		
	Recibidos correctamente	No recibidos
Node[0]	19 (63%)	11 (37%)
Node[1]	19 (63%)	11 (37%)
Node[2]	16 (60%)	14 (40%)
Node[3]	18 (53%)	12 (47%)
	72 (60%)	48 (40%)

Tabla 14. Resultados simulación real móvil

Si se realiza una comparación con el anterior despliegue real:

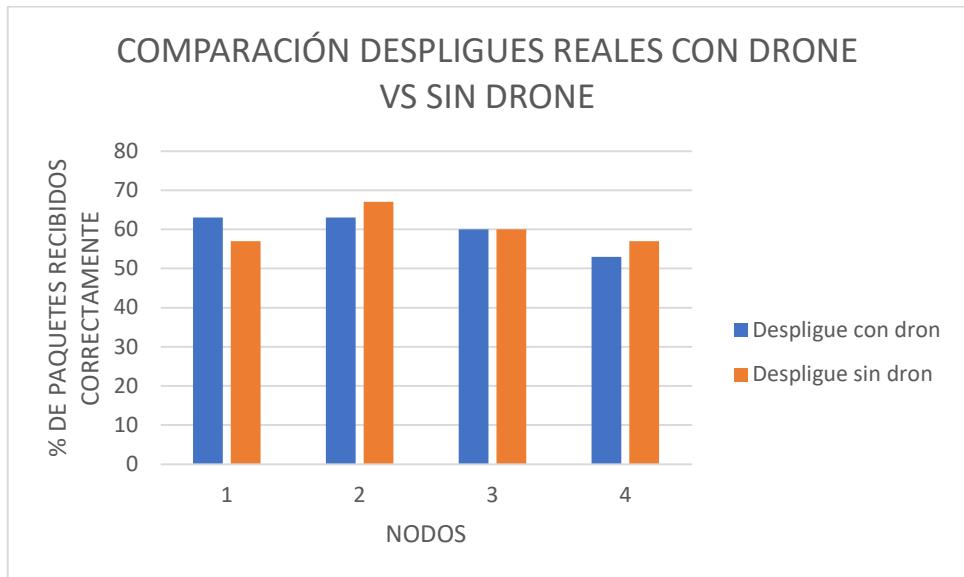


Ilustración 21. Comparación despliegue real con dron vs sin dron

Como se puede apreciar, no ha habido mejora, el número de paquetes total enviado ha sido exactamente el mismo, simplemente ha variado un poco la llegada de paquetes individualmente por nodo, pero nada notable.

A continuación, se va a comentar el material necesario para llevar a cabo la simulación. Hay que tener en cuenta que actualmente se trata de una tecnología que no está plenamente extendida por lo que el precio puede ser algo más elevado de lo normal, sin embargo, es de fácil adquisición.

La red a desplegar se trataría de una de corto alcance para el estándar LoRa, en torno a los 500m o 1Km, sobre todo al querer limitar el desembolso en material. Pero los conceptos y despliegue serían los mismos en el caso de querer desplegar una red de largo alcance, únicamente se deberían sustituir algunos elementos de la red por otros orientados a largas distancias. En todo caso, no deberían ser necesarios estos componentes orientados a rangos de cobertura más altos, ya que la idea sería solventar estos problemas de distancias con la propia movilidad del Gateway.

El primer elemento en el que se debería pensar es en los nodos que se van a emplear. Aquí se podrían utilizar diferentes dispositivos, sin embargo, la opción favorita elegida es el utilizado por los despliegues llevados a cabo por Natalia Torres en su Trabajo de Fin de Grado [25].

- **Módulo IoT LoRa ESP32 OLED WiFi SX1276 con antena**

Este dispositivo, junto con el siguiente, constituirían los nodos sensores. Como se ha comentado se ha elegido este modelo de dispositivos por su familiaridad y facilidad de uso. Permiten tomar medidas de su entorno gracias a los sensores integrados y transmitir estos datos vía ondas de radio usando la tecnología LoRa a un Gateway.

El consumo de energía de estos módulos es muy bajo, permiten conexiones Bluetooth y enlaces inalámbricos de radio tipo LoRa. Todo ello se basa en un chip BLE, otro ESP32 y finalmente un chip LoRa Semtech SX1276 para conectarse a redes LoRaWAN.



Ilustración 22. Módulo IoT LoRa ESP32 OLED WiFi SX1276 con antena

Como se puede observar en la Ilustración 17, estos módulos a través del puerto microUSB, permiten tanto la conexión a la alimentación como a una batería. Además, cuentan con una pequeña pantalla a través de la cual se pueden mostrar pequeños mensajes. Sus características técnicas se resumen en la siguiente tabla:

Características Módulo IoT LoRa ESP32	
Frecuencia dominante	240 MHz
Flash	8Mbyte
Procesador	Procesador de Tensilica LX6 Dual Core
Maestro chip	ESP32
LoRa chip	SX1276
Banda de frecuencia de soporte	868-915MHz
Distancia de comunicación abierta	2,8 Km
Capacidad de computación	Hasta 600DMIPS
Bluetooth	Tradicional y de bajo consumo BLE
Entorno de desarrollo	Soporte perfecto para Arduino
Voltaje de funcionamiento	3,3-7V
Rango de temperatura de funcionamiento	-40° a 90°
Sensibilidad del receptor	-139dbm
Rendimiento continuo UDP	135Mbps
Adaptador USB chip	CP2102

Tabla 15. Características Módulo IoT LoRa ESP32

El precio de este elemento podría rondar entre los 20-30€, dependería del proveedor que se elija.

A los nodos se les tendría que añadir un sensor para captar la información que se deseé: temperatura, presión, humedad, luminosidad, etc. Este tipo de sensores son muy baratos y no deberían superar los 5€. Simplemente habría que elegir uno que admita la conexión I2C para que sea compatible con una placa Arduino o Raspberry Pi.

Añadiendo este dispositivo al módulo LoRa anterior, el nodo sería capaz de comunicarse con el Gateway y enviarle los datos obtenidos.

El Gateway es el dispositivo que se encargará de recibir los paquetes de datos enviados por los nodos sensores a través de la tecnología LoRa y los transmite vía internet al servidor The Things Network (TTN). Basándose en el criterio anteriormente empleado, se elegirá el dispositivo que utilizó Natalia Torres en su trabajo. El dispositivo es el siguiente:

- **Gateway RAK 2245 con Raspberry Pi 3B**



Ilustración 23. Raspberry Pi 3 Model B



Ilustración 24. RAK 2245

La arquitectura de este dispositivo consiste en una Raspberry Pi, una antena y un concentrador. El concentrador es un módulo transmisor/receptor diseñado para recibir paquetes de datos enviados desde distintos dispositivos finales (en este caso los nodos sensores).

El precio de la construcción de este Gateway rondaría los 160€.

Por último, quedaría añadir el dispositivo que se encargaría de la movilidad, en este caso, se ha valorado que la mejor opción es un dron o hexacóptero.

Se puede elegir cualquier tipo de hexacóptero, siempre y cuando cumpla las siguientes características:

- Pueda soportar una carga de mínimo 200 gramos.
- Tenga una autonomía de vuelo de unos 15 minutos.
- Su rango de alcance sea de unos 500m, este valor es variable, ya que dependerá de los despliegues que se deseen hacer.
- Recomendable que su vuelo pueda ser programable mediante ficheros de trazas.

Los precios de estos dispositivos son muy variables, dependiendo de la calidad de estos, sin embargo, de media pueden costar unos 2000€.

Dicho esto, un presupuesto estimado para la puesta en marcha de un despliegue con Gateway móvil rondaría los 2200€. Como se ha comentado, al final el elemento clave y más costoso es el dispositivo que aportará la movilidad, es por esto por lo que es más difícil de conseguir y el que decidirá la mayor parte del presupuesto.

A pesar de tener todos los dispositivos, hay que tener en cuenta los aspectos legales de este tipo de vuelos utilizando drones, algunas de las limitaciones generales para el vuelo de drones en España son las siguientes [41]:

- Nunca sobrepasar los 120 m de altura en vuelo.
- No volar en un mínimo de 8 km de cualquier aeropuerto, aeródromo o espacio aéreo controlado.
- Será necesario tener contratada una póliza de seguro que cubra la responsabilidad civil frente a terceros por daños que puedan surgir durante y por causa de la ejecución de cada vuelo que se realice.
- El dron deberá llevar una placa identificativa ignífuga fijada en la estructura que contendrá datos como el nombre del fabricante, el modelo, número de serie (si corresponde) y los datos de contacto del piloto.
- No es necesario registrar el dron, a menos que éste esté certificado. Lo que sí es obligatorio es su registro en AESA, independientemente de los drones que se estén operando.
- El registro será válido durante 5 años y se reconocerá en todos los países miembros de EASA. Únicamente estás exento de registrarte si tu dron es considerado un 'juguete' según la directiva 2009/48/CE.

### 3.2.4 Análisis de rendimiento

En los apartados anteriores se ha mostrado la comparación entre los resultados de las diferentes configuraciones. En ellas se han visto los cambios en el alcance de los nodos con los diferentes SF. Sin embargo, esto no solo afecta al alcance, sino que repercute en otras medidas de rendimiento.

Es por esto por lo que se ha decidido realizar un análisis de rendimiento de diferentes parámetros como pueden ser la velocidad de transmisión (Bitrate), tiempo en el aire (Time on air), consumo de energía y utilización del canal del Gateway.

Las comparaciones se efectuarán entre diferentes configuraciones en las que cambiará el SF de las simulaciones del entorno definitivo con movilidad sobre el Gateway.

A partir de los resultados obtenidos se llevará a cabo una evaluación de las ventajas y desventajas de cada despliegue.

El SF, es el factor que determina el tiempo que estará la señal de radio en el aire, es por esto que a más SF, más lentas serán las transmisiones, mayor será la ocupación del canal y, por lo tanto, mayor será el consumo.

Para empezar, se va a realizar la comparación de las velocidades de transmisión y de los tiempos en el aire. Aparte de realizar esta medida mediante los ficheros de resultados generados por las simulaciones, la propia página web de LoRa ofrece una calculadora [43] en la que se puede obtener esta información, simplemente añadiendo los parámetros de la siguiente imagen:

The image shows a user interface for a 'air-time calculator'. It has four input fields with labels above them: 'Input Bytes' (value: 25), 'Spreading Factor' (value: SF12), 'Region' (value: EU868), and 'Bandwidth' (value: 125 kHz). Each field has a question mark icon in its top right corner.

Input Bytes	Spreading Factor	Region	Bandwidth
25	SF12	EU868	125 kHz

Ilustración 25. Parámetros air-time calculator

Comentar que, en las simulaciones realizadas, los paquetes tenían un tamaño de 10 Bytes y que el ancho de banda utilizado ha sido de 125 kHz. En cuanto a la región utilizada había dos opciones, Europa o Estados Unidos. Por motivos obvios se ha elegido la primera opción.

Los datos recopilados de las velocidades de transmisión por parte de los nodos han sido las siguientes:

SF	Bitrate (bits/sec)
7	5470
8	3125
9	1760
10	980
11	440
12	250

Tabla 16. Tabla de análisis de rendimiento del bitrate.

Se puede observar que a medida que aumenta el SF, se reduce drásticamente la velocidad de transmisión. Dependiendo de la tarea a realizar, esto puede ser un factor a tener en cuenta.

A continuación, se van a mostrar los diferentes tiempos en el aire de las señales de radio.

SF	Time on air (ms)
7	61.7
8	113.2
9	205.8
10	370.7
11	823.3
12	1482.8

Tabla 17. Tabla de análisis de rendimiento del time on air.

Como era evidente, el tiempo en el aire aumenta significativamente, lo cual se verá más adelante que afectará a factores como el consumo o el tiempo de ocupación del canal.

Los consumos medios de los nodos han sido estos:

SF	Energy consumed (mWh)
7	1,92
8	1,9206
9	2,059
10	2,059
11	2,059
12	3,4746

Tabla 18. Tabla de análisis de rendimiento de los consumos

Como era de esperar, los consumos siguen una trayectoria ascendente conforme aumenta el SF.

Por último, los datos del porcentaje de utilización del canal del Gateway:

SF	% Utilización del canal
7	2,5800
8	2,8700
9	2,8700
10	2,8700
11	2,8776
12	2,8776

Tabla 19. Tabla de análisis de rendimiento de la utilización del canal del Gateway

Como conclusión, se puede ver que al trabajar con un spreading factor reducido, las prestaciones aumentan, sin embargo, las distancias entre los nodos y el Gateway son más limitadas.

Se podría buscar trabajar con un spreading factor intermedio en el que se alcancen distancias más largas, y parámetros como el consumo o el bitrate tengan valores adecuados a las necesidades de cada red.

## 5. CONCLUSIONES

Como se ha podido comprobar, la tecnología LoRa está aún en desarrollo y esto deriva en una actualización rápida y constante de sus herramientas a la hora de trabajar con ella. Las últimas versiones de las tecnologías empleadas han hecho posible la puesta en marcha de las diferentes simulaciones con movilidad sobre el Gateway y su posterior análisis de resultados, el cual ha sido mejorado respecto a las versiones anteriores, ya que los nuevos medios han permitido obtener resultados más completos.

Entrando en el apartado de simulaciones, la nueva movilidad añadida ha permitido solventar problemas anteriormente comentados como era la distancia entre los nodos y el Gateway, acabando de esta manera con posibles incomunicaciones entre estos.

También se ha realizado un pequeño análisis de rendimiento de diferentes parámetros por parte de los nodos, llegando a la conclusión de que tener un menor SF puede resultar muy positivo a la hora de realizar comunicaciones con mejores prestaciones y además de un menor consumo. El único punto negativo resultaría en el alcance de estos.

Por ello, combinando estos dos puntos, se pueden llegar a realizar despliegues con un rendimiento muy alto en los que las distancias no sea un problema.

Esto puede resultar una herramienta muy útil para terrenos amplios que se encuentren en exteriores, donde se puedan realizar vuelos con dispositivos preparados para este tipo de trabajos. Este tipo de condiciones se pueden dar en el ámbito agrícola y ganadero, pues sus explotaciones suelen ser terrenos de varios kilómetros cuadrados en los que sus extensiones están sin edificar.

Sería interesante en un futuro poder llevarlo a cabo en un entorno real, si puede ser, en una explotación agrícola o ganadera, que como se ha visto, son los campos a los que les puede resultar más llamativa esta idea.

Por último, comentar en el ámbito académico, la aportación que ha hecho el grado de Ingeniería Informática a la hora de adquirir los conocimientos necesarios para el desarrollo de este TFG. En especial, las asignaturas relacionadas con las redes, ya que han sido de gran ayuda en el momento de comprender ciertos conceptos como pueden ser los paquetes, anchos de banda, frecuencias, etc.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AKRAM, Shaik Vaseem, et al. Performance Analysis of IoT and Long-Range Radio-Based Sensor Node and Gateway Architecture for Solid Waste Management. *Sensors*, 2021, vol. 21, no 8, p. 2774.
- [2] ALVEAR, Óscar, et al. Assessing the impact of mobility on lora communications. En *Interoperability, Safety and Security in IoT*. Springer, Cham, 2017. p. 75-81.
- [3] ANDREI, Marius Lucian; RĂDOI, Liviu Alexandru; TUDOSE, Dan Ștefan. Measurement of node mobility for the LoRa protocol. En *2017 16th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet)*. IEEE, 2017. p. 1-6.
- [4] BonnMotion - A mobility scenario generation and analysis tool. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <http://sys.cs.uos.de/bonnmotion/>
- [5] BonnMotionMobility. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <https://doc.omnetpp.org/inet/api-current/heddoc/inet.mobility.single.BonnMotionMobility.html>
- [6] Campos, F. (2021). LPWAN: qué son y para qué se utilizan - M2M - Logitek. Retrieved 12 August 2021, from <https://www.m2mlogitek.com/lpwan-que-son-y-para-que-se-utilizan/>
- [7] Cheruvu, S., Kumar, A., Smith, N., & Wheeler, D. (2021). IoT Frameworks and Complexity. Retrieved 12 August 2021, from
- [8] Datos", A., DISCERN, C., 25000, L., PA, E., & CHAPP, S. (2021). ISO 25010. Retrieved 3 October 2021, from <https://iso25000.com/index.php/normas-iso-25000/iso-25010>
- [9] FERREIRA, Ana Elisa, et al. A study of the LoRa signal propagation in forest, urban, and suburban environments. *Annals of Telecommunications*, 2020, vol. 75, no 7, p. 333-351.
- [10] Home | FLoRa - A Framework for LoRa simulations. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <https://flora.aalto.fi/>
- [11] Home Page. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <http://pages.lora-alliance.org.pages.services/Agriculture-Vertical-Market/?ts=1%2580%A6>
- [12] Home Page. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <http://pages.lora-alliance.org.pages.services/Buildings-Vertical-Market/?ts=160%2580%A6>
- [13] Home Page. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <http://pages.lora-alliance.org.pages.services/Utilities-Vertical-Market/?ts=160%2580%A6>
- [14] Home Page. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <http://pages.lora-alliance.org.pages.services/Logistics-Vertical-Market/?ts=160%2580%A6>
- [15] Home Page. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <http://pages.lora-alliance.org.pages.services/Industry-Vertical-Market-1/?ts=16%2580%A6>
- [16] Home Page. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <http://pages.lora-alliance.org.pages.services/Cities-Vertical-Market/?ts=160127%2580%A6>
- [17] Homepage - LoRa Alliance®. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <https://lora-alliance.org/>

- [18] INET Framework - What Is INET Framework?. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <https://inet.omnetpp.org/Introduction.html>
- [19] Learn More. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <http://pages.lora-alliance.org.pages.services/Agriculture-Vertical-Market/learn-more.html?ts=1601965506118>
- [20] Learn More. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <http://pages.lora-alliance.org.pages.services/Buildings-Vertical-Market/learn-more.html?ts=1601965591130>
- [21] Learn More. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <http://pages.lora-alliance.org.pages.services/Utilities-Vertical-Market/learn-more.html?ts=1601965013987>
- [22] LoRa and LoRaWAN: Technical overview | DEVELOPER PORTAL. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <https://lora-developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>
- [23] LoRaWAN - Wikipedia, la enciclopedia libre. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <https://es.wikipedia.org/wiki/LoRaWAN>
- [24] LoRaWAN® Vertical Markets - LoRa Alliance®. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <https://lora-alliance.org/lorawan-vertical-markets/>
- [25] Natalia Torres Olivas, (2020), Despliegue de una red Lora para el entorno rural en la provincia de Teruel, Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Zaragoza
- [26] Node Mobility — INET 4.3.0 documentation. (2021). Retrieved 5 October 2021, from <https://inet.omnetpp.org/docs/users-guide/ch-mobility.html#list-of-mobility-models>
- [27] OMNeT++ - Wikipedia, la enciclopedia libre. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <https://es.wikipedia.org/wiki/OMNeT%2B%2B>
- [28] OMNeT++ 6.0 Preview 10 Available. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <https://omnetpp.org/software/2020/12/18/omnet-6-pre10-released.html>
- [29] OMNeT++ Documentation. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <https://omnetpp.org/documentation/>
- [30] ¿Por qué actualmente es tan importante el IoT? - Máster en Industria 4.0: Universidad de Alcalá - Madrid. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <https://www.masterindustria40.com/importancia-iot-master/>
- [31] ¿Qué es el Desarrollo Sostenible y los Objetivos Globales? | ACCIONA. (2021). Retrieved 2 October 2021, from [https://www.accion.com/es/desarrollo-sostenible/?\\_adin=02021864894](https://www.accion.com/es/desarrollo-sostenible/?_adin=02021864894)
- [32] ¿Qué es IoT (Internet Of Things)? . (2021). Retrieved 12 August 2021, from <https://www2.deloitte.com/es/es/pages/technology/articles/iot-internet-of-things.html>
- [33] Red de sensores - Wikipedia, la enciclopedia libre. (2021). Retrieved 12 August 2021, from [https://es.wikipedia.org/wiki/Red\\_de\\_sensores](https://es.wikipedia.org/wiki/Red_de_sensores)
- [34] Retrieved 12 August 2021, from <https://es.scribd.com/document/134035545/1-Information-Technology-for-Management-Transforming-Organizations-in-the-Digital-Economy>
- [35] Retrieved 12 August 2021, from <https://s3-usa.s3.amazonaws.com/c/308475593/media/62965f2cbbc4cf81f39467445720088/PesslDairyOptimization.pdf>

- [36] Retrieved 12 August 2021, from <https://s3-usa.s3.amazonaws.com/c/308475593/media/56335f2cc0189a7c545711125624647/ConservTektelic.pdf>
- [37] Retrieved 12 August 2021, from <https://s3-usa.s3.amazonaws.com/c/308475593/media/16265f2d7ca4d429043171859515286/thingParkChina.pdf>
- [38] Retrieved 12 August 2021, from <https://s3-usa.s3.amazonaws.com/c/308475593/media/16645f2d848014c2780351230654763/AloxyValveMonitoring.pdf>
- [39] Retrieved 12 August 2021, from <https://s3-usa.s3.amazonaws.com/c/308475593/media/63415f3041f0b077149634462595948/AloxyEyeWashStations.pdf>
- [40] Retrieved 12 August 2021, from <https://s3-usa.s3.amazonaws.com/c/308475593/media/18625f2c570b4a5dc73779020918137/PVHControlSystems.pdf>
- [41] Retrieved 17 October 2021, from <https://www.oneair.es/normativa-drones-espana-aesa/>
- [42] The Network Simulator - ns-2. (2021). Retrieved 5 October 2021, from <https://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [43] The Things Network. (2021). Retrieved 26 August 2021, from <https://www.thethingsnetwork.org/airtime-calculator>
- [44] Unboxing., F. (2021). Finally De Habsburgo Sap Hard Copy Not Printing Black Metal Roof Texture S2415h Unboxing. Retrieved 12 August 2021, from <https://musicsubway.blogspot.com/2021/03/finally-de-habsburgo-sap-hard-copy-not.html>
- [45] Verificación de redundancia cíclica - Wikipedia, la enciclopedia libre. (2021). Retrieved 12 August 2021, from [https://es.wikipedia.org/wiki/Verificaci%C3%B3n\\_de\\_redundancia\\_c%C3%ADclica](https://es.wikipedia.org/wiki/Verificaci%C3%B3n_de_redundancia_c%C3%ADclica)
- [46] vida, C., vida, F., & humano, I. (2021). Calidad de vida | Economipedia. Retrieved 12 August 2021, from <https://economipedia.com/definiciones/calidad-de-vida.html>
- [47] What is OMNeT++?. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <https://omnetpp.org/intro/>
- [48] What is the Internet of Things (IoT)??. (2021). Retrieved 12 August 2021, from <https://www.oracle.com/internet-of-things/what-is-iot/>