

## Trabajo Fin de Grado

### **Despliegue de una red Lora para el entorno rural en la provincia de Teruel**

Deployment of a Lora network for the rural  
environment in the province of Teruel

Autora

Natalia Torres Olivas

Directores

Francisco José Martínez Domínguez

Piedad Garrido Picazo

Escuela Universitaria Politécnica de Teruel

Universidad de Zaragoza

2020



# Despliegue de una red Lora para el entorno rural en la provincia de Teruel

## RESUMEN

El término Internet de las cosas o Internet of Things (IoT) está evolucionando de tal manera en el ámbito de las TICs que se cree que va a suponer una auténtica revolución tecnológica. Gracias al gran despliegue de sensores de distinta naturaleza, se pueden obtener datos de casi cualquier tipo de parámetro cuantificable, además esta información proporcionada por los sensores es enviada a un punto receptor en el que es tratada y analizada por la aplicación que necesita hacer uso de dichos datos.

En este TFG se ha realizado un estudio exhaustivo sobre la tecnología LoRa, teniendo en cuenta los parámetros principales de ésta y cómo afectan a la red. Para analizar en detalle el comportamiento de la infraestructura, este estudio se ha realizado en dos planos: (i) usando el entorno de simulación Flora, basado en OMNET++, y (ii) realizando un despliegue real con dispositivos LoRa. De esta forma, se pretende estudiar los diferentes parámetros de configuración para poder decidir cuál de las diferentes configuraciones será la mejor en el entorno rural. El objetivo final es dar unas directrices para el despliegue de una infraestructura LoRa que permita conectar las explotaciones agrícolas y ganaderas en la provincia de Teruel.

Más en detalle, el trabajo ha consistido en simular 4 entornos distintos en FLoRa, y posteriormente llevar a la realidad el despliegue de 2 de ellas, pudiendo así ver la variación de los parámetros que intervienen, y conocer el nivel de precisión de la simulación. Tras analizar distintas configuraciones, se observa que aquella con valores óptimos en sus parámetros, consume menos energía. También cabe destacar, que al llevar a la realidad estos despliegues, se ha comprobado que se deben variar alguno de los parámetros para que se pueda establecer la comunicación (el área de cobertura (SF) se ha disminuido de 12 a 9-10), a pesar de que el simulador determinaba que la comunicación era posible.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, finalmente, se propone la configuración adecuada para trabajar con este tipo de tecnología y dispositivos en la provincia de Teruel, donde sus características especiales y la escasez de este tipo de redes, hacen el lugar adecuado para su despliegue en el entorno rural.

## Palabras clave

LoRa, LoRaWAN, Internet de las cosas (IoT), agricultura y ganadería inteligentes, Redes de Sensores Inalámbricos (WSN), Teruel.

## Tabla de contenidos

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	8
2. ESTADO DEL ARTE .....	12
2.1. SMART CITIES .....	13
2.2. INDUSTRIA Y TRANSPORTE .....	13
2.3. SALUD .....	13
2.4. MEDIOAMBIENTE .....	14
2.5. AGRICULTURA Y GANADERÍA.....	14
3. PROPUESTA.....	15
3.1. SIMULACIÓN .....	16
3.1.1. Tecnologías empleadas.....	16
3.1.2. Simulaciones realizadas .....	18
3.1.3. Resultados obtenidos .....	25
3.1.4. Conclusiones.....	31
3.2. DESPLIEGUE REAL .....	34
3.2.1. DISPOSITIVOS UTILIZADOS .....	35
3.2.2. CONFIGURACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS.....	38
3.2.3. COMUNICACIÓN Y TESTEO .....	46
3.2.4. DESPLIEGUE 1 .....	47
3.2.5. DESPLIEGUE 2 .....	52
3.3. COMPARATIVA .....	55
3.4. PROPUESTA PARA DESPLIEGUE REAL .....	56
CONCLUSIONES .....	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	59
ANEXOS.....	64
ANEXO 1. MARCO TEÓRICO .....	64
Redes de baja potencia y largo alcance - LPWAN .....	64
Tecnología LoRaWAN .....	66
Dispositivos finales.....	70
Gateways.....	70
Servidor.....	70
Servidor de Aplicación.....	70
ANEXO 2. RESULTADOS DESTACADOS DE LAS SIMULACIONES .....	73



## Índice de figuras

Figura 1. Casos de uso LoRaWAN.....	12
Figura 2. Infraestructura Simulación 1 en el entorno Omnet++.....	19
Figura 3. Escenario Simulación 1 mapa terreno real (Calle Siete, Villarquemado, Teruel) .....	20
Figura 4. Infraestructura Simulación 2 en el entorno Omnet++.....	23
Figura 5. Infraestructura Simulación 3 en el entorno Omnet++.....	24
Figura 6. Infraestructura Simulación 4 en el entorno Omnet++.....	24
Figura 7. Infraestructura Simulación 4 en el entorno Omnet++.....	25
Figura 8. Energía consumida-Sim1 .....	26
Figura 9. Energía consumida-Sim2.....	26
Figura 10. Energía consumida-Sim3.....	26
Figura 11. Energía consumida-Sim4.....	27
Figura 12. Pérdidas-Sim1 .....	28
Figura 13. Pérdidas-Sim2.....	28
Figura 14. Pérdidas-Sim3.....	28
Figura 15. Pérdidas-Sim4.....	29
Figura 16. Utilización del canal -Sim1 .....	30
Figura 17. Utilización del canal -Sim2 .....	30
Figura 18. Utilización del canal -Sim3 .....	30
Figura 19. Utilización del canal -Sim4 .....	31
Figura 20. Energía consumida/Simulación para la configuración 1 .....	32
Figura 21. Tasa de pérdidas/Simulación para la configuración 10.....	33
Figura 22. Elementos arquitectura Gateway RAK2245.....	35
Figura 23. Módulo IoT LoRa ESP32 OLED WiFi SX1276 con antena .....	36
Figura 24. Sensor barométrico I2C SPI BMP280 .....	37
Figura 25. Disposición inicial dispositivos .....	38
Figura 26. Componentes Nodo LoRa.....	38
Figura 27. Creación cuenta TTN.....	39
Figura 28. Gateways desplegados a través de TTN.....	40
Figura 29. Gateways TTN en España .....	40
Figura 30. Gateways TTN en la provincia de Teruel .....	41
Figura 31. Consola TTN.....	42
Figura 32. Gateway registrado .....	42
Figura 33. Vista aplicación recientemente creada.....	42
Figura 34. Configuración parámetros Arduino IDE.....	44
Figura 35. Sketch license.io .....	44
Figura 36. Consola COM3 Arduino IDE .....	44
Figura 37. Obtención de la licencia (Web Heltec) .....	45
Figura 38. Registro del dispositivo completado .....	45
Figura 39. Código añadido al Sketch OTAA.io .....	46
Figura 40. Nodo en funcionamiento .....	46
Figura 41. Visualización del tráfico de paquetes entre Gateway y nodo LoRa (Consola TTN) .....	47
Figura 42. Nodo sensor-Despliegue 1 .....	47

Figura 43. Paquete recibido por el gateway (Consola TTN).....	48
Figura 44. Desglose del paquete recibido .....	48
Figura 45. Desglose del paquete enviado por el nodo .....	49
Figura 46. Código que obtiene los datos del sensor BMP280.....	49
Figura 47. Código de la función setup() para inicializar los parámetros.....	50
Figura 48. Parte del código de la función loop() .....	50
Figura 49. Variación RSSI-Despliegue1 .....	52
Figura 50. Variación SNR-Despliegue1 .....	52
Figura 51. Mapa satélite – Despliegue 2.....	52
Figura 52. Nodo sensor-Despliegue 2.....	53
Figura 53. Variación RSSI-Despliegue2 .....	54
Figura 54. Variación SNR-Despliegue2 .....	54
Figura 55. Relación AirTime-SF .....	54
Figura 56. Energía consumida/Despliegue .....	55
Figura 57. Tasa pérdidas/despliegue .....	55
Figura 58. Mapa satélite de la red LoRa simulada en Villarquemado (Teruel) ..	57
Figura 59. Infraestructura y comunicación en la Simulación de Villarquemado (Teruel) en el entorno Omnet++ .....	58
Figura 60. Tecnologías inalámbricas (BW/Range) .....	64
Figura 61. Capas modelo OSI .....	67
Figura 62. Arquitectura LoRaWAN .....	67
Figura 63. Esquema red LoRa .....	69

## Índice de tablas

Tabla 1. Características despliegue 1 .....	19
Tabla 2. Configuraciones realizadas en cada simulación.....	21
Tabla 3. Características despliegue 2.....	22
Tabla 4. Características despliegue 3.....	23
Tabla 5. Características despliegue 4.....	24
Tabla 6. Mejores valores de Energía consumida por Simulación-Configuración	31
Tabla 7. Coste €/h.....	32
Tabla 8. Mejores valores de tasa de pérdidas por Simulación-Configuración...	33
Tabla 9. Configuraciones óptimas.....	33
Tabla 10. Valores Simulación-Configuraciones óptimas .....	34
Tabla 11. Características Módulo IoT LoRa ESP32 .....	36
Tabla 12. Promedio datos paquetes/hora – Despliegue 1 .....	51
Tabla 13. Promedio datos sensor/hora – Despliegue 1 .....	51
Tabla 14. Promedio datos paquetes/hora – Despliegue 2 .....	53
Tabla 15. Promedio datos sensor/hora – Despliegue 2 .....	53
Tabla 16. Características Simulación Villarquemado (Teruel) .....	56
Tabla 17. Banda de frecuencias ISM.....	65
Tabla 18. Sigfox vs. LoRaWAN.....	66
Tabla 19. Parámetros de conexión dispositivos LoRa .....	68
Tabla 20. Planes de frecuencia por país (España) .....	68
Tabla 21. Características EU863-870MHz ISM Band .....	69
Tabla 22. Datos Simulación 1 .....	73
Tabla 23. Datos Simulación 2.....	74
Tabla 24. Datos Simulación 3.....	75
Tabla 25. Datos Simulación 4.....	76

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Actualmente se convive en una sociedad en la que la información es poder, las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs) están presentes en casi todos los ámbitos, siendo cada vez más accesibles, sin olvidar tampoco que la mayor parte del planeta tiene acceso a Internet. De todo esto se deduce que esta sociedad lo que busca es estar en constante conexión, no solo con otras personas, sino también con objetos de su propio entorno. Es aquí cuando surge el concepto de Internet de las Cosas o Internet of Things (IoT) [OracleIoT20].

El Internet de las cosas (IoT) pretende realizar una infraestructura global en la que se consiga la interconexión de objetos cotidianos a través de Internet, de forma que dichos objetos puedan recoger y transmitir datos entre ellos, intercambiando información, y todo ello, sin intervención humana.

Esta forma de comunicación propicia el aumento de aplicaciones inteligentes en diversos ámbitos, desde el medio ambiente y la logística, hasta la seguridad o la industria, e incluso sectores como agricultura y ganadería, sin olvidar las ciudades inteligentes o Smart cities [RuedaPortocarrero16].

Muchas de estas aplicaciones IoT integran redes de sensores inalámbricas, o más conocidas como Wireless Sensor Networks (WSN). Se trata de un conjunto de nodos capaces de recoger, procesar, analizar y transmitir información sobre su entorno. Para ello, estos dispositivos deben tener un coste reducido y largo alcance, pues deben perdurar en el tiempo, evitando un mantenimiento frecuente [WikipediaWSN20].

Para que los nodos cumplan estas características se utiliza LPWAN (Low Power Wide Area Network), redes de baja potencia y largo alcance que permiten enviar pequeñas cantidades de datos a grandes distancias con poco consumo [LPWANRouse20]. Dentro de estas tecnologías LPWAN conviene destacar LoRaWAN, cuya tasa de transmisión de datos es notable, tiene bajo coste económico y su uso es gratuito [AlonsoLPWAN17].

Dicha especificación será detallada más adelante, pero como introducción a ella, conviene destacar que LoRaWAN permite generar una red inalámbrica de sensores LoRa [LoRaWANLoRa20], cuya estructura básica suele contar con una serie de nodos, gateways, servidor de red y aplicaciones. Los nodos recolectan la información, la envían al gateway a través de ondas de radio y éste la transfiere al servidor por medio de Internet. Desde el servidor, vía Internet también, llega hasta una aplicación, que puede consultar el usuario.

Y es que como se puede apreciar en esta revolución digital o revolución de los datos en la que vive la sociedad actual, existe una necesidad de medir todos los datos posibles, ofrecerlos a los usuarios y que éstos sean capaces de generar economía a partir de la información analizada. Pues ya se sabe, que el objetivo primordial es intentar mejorar la vida de las personas en la medida

de lo posible, centrando la atención en el usuario, adecuándose a sus necesidades. Esto se engloba en dos conceptos que actualmente se encuentran en auge y conviene mencionar. Por un lado, la economía de los datos (Riqueza 4.0), se considera la cuarta revolución industrial, pero en este caso en vez de estar sustentada por algún descubrimiento o innovación, su elemento primordial es el dato. No los datos en sí mismos, pues de este modo carecen de valor, sino éstos siendo objetos de un proceso de refinamiento, procesamiento y análisis, que permite dotarlos de un gran valor económico [OntiverosRiqueza4.0yEconomía17].

Por otro lado, a pesar de obtener economía empleando los datos como producto, hay que considerar la calidad de vida de los usuarios (Quality of Life –QoL) como prioridad y es aquí cuando interviene el término de sociedad 5.0. [ArsovskiQoL19]. Actualmente, se está evolucionando hacia una sociedad que va más allá, se pretende conseguir llegar a un entorno en el que se usen los datos como un nuevo recurso para resolver problemas sociales y problemas de la vida cotidiana complejos, es resumen, conseguir llegar a mejorar la calidad de vida de las personas, ya que toda la evolución tecnológica que se está dando está afectando a las necesidades de los habitantes actuales y futuros, éstas están cambiando rápidamente y por ello conviene integrar el concepto de QoL en la sociedad.

Además, si tenemos en cuenta la situación en la que se encuentra actualmente la sociedad, la crisis sanitaria, pero también social y económica, ocasionada por la pandemia mundial del COVID-19, aún tienen todavía más sentido estos factores mencionados. Y es que se ha puesto de manifiesta que en esta nueva normalidad, el papel de las tecnologías de la información es imprescindible puesto que mientras el mundo presencial se para, el digital se dinamiza y permite, al menos para una gran parte de ciudadanos y empresas, seguir desempeñando su trabajo con eficacia, comunicarse con otras personas y adquirir bienes y servicios, entre otras cosas. Pero las TICs no sólo proporcionan ayuda desde esta perspectiva, sino también con herramientas como la analítica de datos o la inteligencia artificial, que combinadas con el IoT están intentando ayudar a frenar la expansión del COVID-19, haciendo uso de propuestas como las de este TFG.

Por otra parte, la provincia de Teruel actualmente es bastante conocida por el tema de la España Vacía debido a su despoblación (su población representa tan solo un 0,29 % de la del territorio nacional) [DemografíaWikipedia20].

La provincia de Teruel se encuentra mayoritariamente en el área meridional del Sistema Ibérico, aunque una parte del noreste pertenece ya a la depresión del Ebro (Bajo Aragón). Está caracterizada por su relieve y paisaje de montaña mediterránea, alternando sierras y macizos, con depresiones [RelieveWikipedia20]. La situación de la provincia con respecto a la propia

disposición de las cadenas montañosas peninsulares, que la protegen de las influencias marinas, dan lugar a unas condiciones climáticas mediterráneas, en las que los máximos de precipitación se dan en primavera y otoño y el verano no es excesivamente seco a causa de las tormentas típicas de esta época [ClimaWikipedia20].

Todas estas condiciones meteorológicas, sumadas a las grandes zonas de terreno sin edificar, hacen que sea una zona con numerosas explotaciones agrícolas y ganaderas, donde las TICs, pueden resultar de gran utilidad permitiendo aumentar la productividad, reducir los costes y mejorar la rentabilidad de los agricultores y ganaderos. Cada vez se está introduciendo más el concepto de Agricultura Inteligente (Smart Agriculture) [SmartAgricultureRICA19], cómo muchos agricultores están innovando, aplican técnicas de agricultura de precisión basadas en IoT para maximizar su rendimiento y al mismo tiempo garantizar que sus prácticas sean sostenibles. Del mismo modo en la ganadería. Pero en España, y en concreto en Aragón, aún queda mucho por hacer, tal y como muestran estudios como el del futuro del sector agrícola español [FuturoSectorAgrícolaPwC19] y el estudio sobre utilización de las TIC en el sector agrícola de Aragón [EstudioTIC Aragón17].

En ellos, se destaca que el sector agrario aparece clasificado como uno de los que más margen de mejora tiene en casi todos los indicadores de esta sociedad de la información. A modo de ejemplo, si en Aragón el 81,8% de las empresas de 10 o más empleados y con conexión a Internet tienen una página web, ese porcentaje apenas supone el 17,9% en el caso del sector agrario. El pequeño tamaño de las empresas agrarias y el entorno rural son factores que limitan la adopción de TIC [EstudioTIC Aragón17]. Pero, no puede analizarse la situación de la agricultura y la ganadería respecto a las TIC utilizando los mismos indicadores que para el resto de empresas, ya que sus necesidades son muy diferentes. Y es que, en estos estudios se recogen experiencias que muestran un alto nivel tecnológico. Desde localizar en una fase temprana una enfermedad que afecte a una parte de la explotación mediante un dron y aplicar sólo en esa zona el tratamiento; hasta instalar en una parcela sensores inalámbricos, que miden la humedad del aire, de la tierra y de las hojas, por citar algunos ejemplos de aplicaciones reales de IoT. En cuanto a las máquinas y los aperos del campo también incorporan cada vez más técnicas de inteligencia artificial, de forma que aprenden a reconocer patrones para eliminar maleza o fertilizar la tierra [FuturoSectorAgrícolaPwC19].

En el lado de la ganadería también se han implementado técnicas interesantes, gracias a la ganadería de precisión se permite captar la información de distintas clases de sensores, destinados a detectar aspectos como el celo de los animales, vigilar los partos, detectar problemas de salud o controlar la alimentación. Además todos los datos se analizan, procesan y almacenan en la nube, permitiendo que gracias a aplicaciones móviles (cada

vez más en auge), cada agricultor o ganadero pueda hacer un seguimiento personalizado. Como se puede observar, se trata de un sector en el que las TICs pueden servir de gran ayuda a pesar de que todavía queda mucho que recorrer, sobre todo en Aragón, donde las explotaciones agrícolas y ganaderas aún no disponen de gran cantidad de estos avances, a pesar de haber proyectos ya en marcha como ConectAragón [EstudioTIC Aragón17] que está dotando de cobertura de banda ancha a pequeños municipios en los que la agricultura y ganadería desempeña un papel fundamental, con la intención de contribuir a digitalizar el sector primario. Algo que puede ser el comienzo de la agricultura y ganadería de precisión en la comunidad.

Por todas estas razones, se ha creído conveniente enfocar el proyecto hacia este ámbito. El área en cuestión es una zona rural con explotaciones agrícolas y ganaderas situada en la provincia de Teruel (Aragón), más concretamente en el territorio entre los municipios de Villarquemado y Celadas, sin suministro eléctrico y escasa cobertura.

El objetivo principal de este TFG es desplegar una red de sensores inalámbrica LoRa operativa y probar su funcionamiento y alcance, haciendo uso de la tecnología LoRaWAN, para garantizar información y datos de utilidad acerca de cultivos, producciones o ganado; analizarlos con el fin de obtener información relevante para el futuro y maximizar el rendimiento. Para poder alcanzar el objetivo planteado, va a ser necesario realizar los siguientes pasos:

- Investigar y documentarse sobre el tema
- Simular la red de sensores inalámbrica ajustando los parámetros y las características, a un entorno real, para probar su funcionamiento y alcance.
- Llevar a cabo el despliegue real, desarrollando un software que gestionará la comunicación entre el gateway y los nodos que forman la red de sensores inalámbrica.
- Evaluar y comparar ambos desarrollos, estudiando la calidad de la comunicación establecida, el alcance y otra serie de elementos que afecten al correcto funcionamiento de la red.

Finalmente también se quiere plantear como objetivo futuro poder extender este tipo de red LoRa por otras zonas de la provincia, de manera que funcione como una infraestructura básica para el despliegue de aplicaciones IoT.

El presente documento se ha estructurado de la siguiente manera. En primer lugar, una introducción en la que se contextualiza el proyecto tanto desde un punto de vista teórico como tecnológico. Posteriormente, en el estado del arte se analizarán las soluciones tecnológicas aplicadas en los casos de uso más característicos. A continuación, se pasará a plantear la propuesta a realizar y seguidamente el desarrollo de ésta. Primero se explicará la simulación llevada a cabo y después el despliegue real, se analizarán los resultados obtenidos

estableciendo una comparación entre ambas aproximaciones, lo que permitirá obtener una serie de conclusiones al respecto.

Para finalizar, se incluye una sección de referencias bibliográficas, para cuya representación y cita, dentro del texto, se ha seguido la norma ISO 690:2010 Information and documentation. Guidelines for bibliographic references and citations to information resources, cuya equivalente en España es la UNE-ISO 690: Información y documentación. Directrices para la redacción de referencias bibliográficas y de citas de recursos de información.

## 2. ESTADO DEL ARTE

En esta sección se van a presentar una serie de aplicaciones reales en las que se emplean soluciones LoRa, pues los casos de uso en los que se emplea la tecnología LoRaWAN son muy variados, y están siendo aplicados a distintos ámbitos de la vida cotidiana (ver Figura 1).



Figura 1. Casos de uso LoRaWAN [alfaiot20]

A continuación se van a presentar algunos ejemplos de casos de uso, tanto nacionales como internacionales, clasificados por sectores.



## 2.1. SMART CITIES

Dentro de este sector las utilidades son muy variadas, se van a mostrar dos proyectos reales desarrollados en New Delhi (India), cuya resolución se realiza a través de LoRaWAN [CaseStudiesNewDelhi19].

El primer caso está enfocado a la automatización de los servicios domésticos de medición de agua ("Gestión de agua inteligente"), por petición de las autoridades de algunas de las ciudades inteligentes (Smart cities) de la zona.

El segundo caso, es un parking inteligente, centrado en la "Gestión automática de aparcamientos ilegales" con el objetivo de reducir la congestión del tráfico en las intersecciones donde los vehículos aparkan ilegalmente.

## 2.2. INDUSTRIA Y TRANSPORTE

En el sector de la industria, así como para transporte y temas de logística también se está empezando a hacer uso de la tecnología LoRaWAN. Entre los casos existentes se encuentra otro de los proyectos desarrollados en New Delhi, esta vez está centrado en las operaciones involucradas en el proceso de fabricación de vehículos. Los clientes quieren monitorizar el movimiento de los vehículos a través del seguimiento de los almacenes.

No sólo los proyectos se están dando a nivel internacional, en el panorama nacional se encuentra Redexia [Redexia19], una red nacional dedicada al IoT, conocida por llevar a cabo la primera red LoRaWAN en España. Entre sus soluciones destaca un proyecto basado en la geolocalización de los procesos de logística. Una de las piezas fundamentales en las empresas a día de hoy. Permite monitorizar la mercancía, los repartidores, contenedores, camiones e incluso barcos, ofreciendo un análisis basado en los datos recogidos.

## 2.3. SALUD

En el ámbito de la salud, un ejemplo de empresa española en la que se están haciendo proyectos interesantes enfocando LoRa al IoT es AlfaIoT [alfaiot20]. Destaca FENPS, un sistema de notificación temprana de caídas y posicionamiento, que permite la alerta temprana por desorientación o caída de ancianos y dependientes, y que avisa, en cualquiera de sus dispositivos, a familiares o instituciones.

En el marco internacional, y centrándose en un tema muy reciente, Polysense Technologies Inc [Polysense20] ha desarrollado un producto inteligente de monitoreo de la temperatura del cuerpo humano basado en dispositivos LoRa de Semtech [Semtech20]. Los datos en tiempo real de los sensores de temperatura permiten evaluar de manera eficiente a las personas con una temperatura alta. La solución se envió recientemente a Italia para ayudar con sus esfuerzos de respuesta de Coronavirus (COVID-19) [CamarilloCOVID20].

## **2.4. MEDIOAMBIENTE**

Otro proyecto interesante en el panorama internacional, es el llevado a cabo por la organización Internet of Life en el Parque Nacional Mkomazi en Tanzania. Haciendo uso de la tecnología LoRa, ha realizado un despliegue de una red LoRaWAN IoT para rastrear y monitorear la ubicación de especies en peligro de extinción, como son los rinocerontes negros en África [CamarilloRhinos20]. El sensor de seguimiento de rinocerontes se implanta directamente en el cuerno de éstos y muestra la ubicación de los animales dentro del parque, lo que permite al personal de seguridad posicionarse estratégicamente para vigilarlos.

## **2.5. AGRICULTURA Y GANADERÍA**

Finalmente, en el sector agrícola-ganadero también se han desarrollado proyectos interesantes. Por un lado, en el ámbito nacional AlfalOT ha llevado a cabo un estudio sobre la ascariosis porcina en función de las variables ambientales, gracias a la implantación de sensores que permiten monitorizar a los animales, y una plataforma en la nube que permite obtener y estudiar los datos de los mismos.

Sin embargo, la agricultura inteligente (SmartAgriculture) si cabe la posibilidad está más en auge todavía, y es que cuando se trata de agricultura de precisión, los objetivos de los agricultores para las implementaciones son que los dispositivos sean fáciles de instalar, simples de operar y no dependan de cables [SmartAgricultureWhitePaperLAlliance20]. También que las conexiones puedan ser de larga distancia para que los dispositivos se comuniquen con un Gateway que puede estar a pocos kilómetros. Por ello, LoRaWAN encaja perfectamente, ya que cumple con todos los requisitos anteriores. La propia LoRa Alliance ha proporcionado una serie de casos de uso en los que se han desarrollado despliegues LoRa.

### **2.5.1. ESTACIONES METEOROLÓGICAS**

El conocimiento del clima juega el papel más importante en la planificación de la mayoría de las actividades agrícolas, ayuda a los agricultores a decidir cuándo sembrar, cuándo y cuánto regar, cuándo y cuánto rociar fertilizantes o si es necesario proteger los cultivos de las heladas. Proveedores como Pessl Instruments y MCF88 proporcionan estaciones meteorológicas conectadas que registran la temperatura, la humedad, la presión atmosférica, la lluvia y la velocidad del viento y transmiten datos cada 15 minutos. Gracias a LoRaWAN los agricultores pueden conocer el clima de sus explotaciones teniendo una trazabilidad completa a lo largo del tiempo.

### **2.5.2. FERTILIZACIÓN DEL SUELO**

También es imprescindible conocer el estado de fertilización de los campos. Basándose en los datos de los sensores los agricultores pueden recopilar y acceder a datos del suelo como salinidad, aireación, respiración, temperatura del aire, luz, humedad y niveles de nitrógeno, fósforo y potasio

(NPK). Los proveedores ofrecen sensores que toman lecturas a múltiples profundidades en el suelo y que son fáciles de configurar, lo que permite enviar alertas en tiempo real a los teléfonos y portátiles de los agricultores, evitando desperdicios como la fertilización total de una explotación entera.

### **2.5.3. DETECCIÓN DE PLAGAS Y POLINIZACIÓN EN HUERTOS**

Entre el 20 y el 40% de los rendimientos mundiales de los cultivos se pierden anualmente debido a plagas y enfermedades [FAO20], de ahí la necesidad de controlar las plagas. Sin embargo, el uso excesivo de pesticidas puede contaminar los ecosistemas y, en última instancia, hacer que los pesticidas sean menos efectivos.

La agricultura tradicional sigue un procedimiento en el que se usa pesticida siguiendo un calendario de plagas, independientemente de si estas se han detectado o no. Los dispositivos inteligentes están transformando este área de permitiendo el monitoreo en tiempo real, el modelado de movimientos de plagas y el pronóstico de enfermedades, permitiendo a los agricultores saber cuándo y cuánto pesticida usar.

Sin embargo, hay plagas necesarias y algunos agricultores necesitan que sus plantas sean polinizadas. De esta forma, los dispositivos también ofrecen la capacidad de monitorear la actividad de las abejas en las colmenas.

Siendo conscientes del panorama actual sobre los distintos proyectos que se han realizado haciendo uso de la tecnología LoRa, y una vez analizados casos de uso, tanto a nivel nacional como internacional, se ha llegado a la conclusión de que no hay ningún trabajo o planteamiento similar a lo propuesto en el presente TFG, a pesar de que sí existen soluciones relacionadas, como la que se han expuesto. De esta forma, se propone desplegar una red propia de comunicaciones inalámbrica tipo LoRa. Dicho despliegue va a estar orientado a la agricultura y a la ganadería. Se va a centrar en el desarrollo de una red de sensores desplegada por zonas con limitada cobertura, con el fin de realizar una agricultura y ganadería inteligente, que permita la recolección de datos a través de los sensores. Dichos datos serán relativos a los cultivos, a los niveles de temperatura, humedad y otros parámetros relacionados. El sistema propuesto, permitirá recoger, filtrar y analizar información útil, que permitirá mejorar el rendimiento de las explotaciones agropecuarias de la provincia de Teruel.

## **3. PROPUESTA**

La propuesta que se va a llevar a cabo es el despliegue de una red LoRa en una determinada zona rural de la provincia de Teruel (terrenos agrícolas situados en el área geográfica localizada entre los municipios de Villarquemado y Celadas). Como ya se ha mencionado, el objetivo principal de este trabajo es desplegar dicha red de sensores de forma operativa para

probar su funcionamiento y alcance; por tanto, para conseguir los objetivos plasmados, se ha considerado oportuno dividir el trabajo a realizar en 2 partes fundamentales. De esta forma, la propuesta planteada va a consistir en la realización de una simulación de despliegue de la red LoRa en cuestión, detallando funcionamiento, características y resultados obtenidos por un lado; y por otro lado, llevar a cabo el despliegue pero de manera real, obteniendo también resultados y valores reales, con el objetivo de realizar una comparación entre ambos, a partir de la cual podamos sacar conclusiones de interés. Así pues, a continuación se detallará la simulación y seguidamente el despliegue real.

### 3.1. SIMULACIÓN

Una vez analizadas las características de las tecnologías LoRa y LoRaWAN, así como los posibles dispositivos y elementos que integran su infraestructura, conviene llevarlo a la práctica (Anexo 1). El objetivo final es llevar a cabo un despliegue real lo más eficaz posible. Por ello, se ha creído conveniente realizar este punto intermedio, desarrollarlo primero de forma simulada. Lo que va a ser una buena opción, primero, porque se pueden probar varios tipos de alternativas posibles para observar cuál muestra un mejor comportamiento, del mismo modo que se pueden ir variando los valores de los parámetros de cada dispositivo e ir viendo cómo afectan al resultado final. Y segundo, es más sencillo llevar a la práctica una solución sabiendo que ha sido definida y probada previamente, teniendo claros qué dispositivos son necesarios y cómo conviene configurarlos. A continuación se explicará el proceso seguido.

#### 3.1.1. Tecnologías empleadas

El primer paso es configurar el entorno necesario para poder realizar la simulación, para ello se requieren una serie de tecnologías, además de la correcta integración entre ellas. Algo de vital importancia, ya que dependiendo de las versiones y la configuración de cada una, el funcionamiento global puede fallar.

##### Ubuntu

El sistema operativo elegido para instalar todo el entorno ha sido Ubuntu18.04. Se ha optado por esta versión, porque es una de las más estables actualmente y leyendo los requisitos del resto de tecnologías que se necesitan para configurar el entorno, el más recomendable era éste. También se debe instalar Java en su versión 8 y configurarla por defecto en el sistema, pues es un requisito fundamental para que el entorno que se va a detallar a continuación pueda ejecutarse sin problemas.

##### OMNET

OMNeT ++ es una biblioteca y marco de simulación C++ basada en componentes, principalmente para construir simuladores de red [Omnetpp18].

Posee los siguientes componentes:

- Biblioteca de kernel de simulación (C++)
- El lenguaje de descripción de topología NED
- IDE de simulación basado en la plataforma Eclipse
- Documentación y simulaciones de muestra

En cuanto al tema plataformas, el kernel de simulación OMNeT++ está implementado en C++ estándar, y se ejecuta básicamente en todas las plataformas donde hay un compilador C++ moderno disponible, pero como se ha mencionado anteriormente se ha optado por Linux (Ubuntu).

La descarga de este entorno se ha realizado a través de su propia web, aunque dispone de un listado de versiones desde las más antiguas hasta la más reciente publicada el 11 de Mayo de 2020 [Omnetpp18], se ha optado por elegir una versión intermedia, Omnet++ 5.3, ya que como se verá a continuación es la que requiere el entorno de simulación de LoRa (FLoRa). Capaz de ejecutar las simulaciones y del cual se hablará a continuación.

Por último, para enlazar con el siguiente punto, la biblioteca estándar de OMNeT++ es INET Framework, que contiene los componentes imprescindibles en las simulaciones. También es requisito esencial su instalación.

### INET

Se trata de un conjunto 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 para diseñar y validar nuevos despliegues, así como explorar y probar escenarios nuevos o extraños [InetFramework20]. Del mismo modo que con Omnet++, en la propia web te ofrecen un gran listado de versiones, la elegida ha sido Inet 3.6.5, requerida para llevar a cabo la simulación FLoRa.

Inet debe instalarse una vez configurado Omnet++, para poder integrarlo en él. Ofrece distintas alternativas, tanto por el propio entorno visual como por línea de comandos a través de terminal. Sin embargo, el proceso es largo y hay que tener especial cuidado en los detalles para conseguir que la integración sea la adecuada, y por tanto, se ejecute el conjunto correctamente. Se ha seguido la guía proporcionada por el propio Omnet++ [InstallationGuideOmnetAndrás16].

### FLoRa

Acrónimo de Framework for LoRa, es un entorno de simulación para llevar a cabo simulaciones para redes LoRa. Se basa en el simulador de red OMNeT++ empleando conjuntamente componentes de INET [FLoRa18].

Permite la creación de redes LoRa, proporcionando módulos para nodos LoRa, puertas de enlace (gateways) y un servidor de red. La lógica de la aplicación se puede implementar a través de 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. Además, proporciona un escenario de muestra, que puede tomarse como punto de partida.

La instalación de este framework es la que condiciona las versiones de los dos anteriores (tanto Omnet++ como Inet), ya que algunos de sus componentes no son capaces de ejecutarse en todas las versiones. Para llevarla a cabo, simplemente hay que integrar FLoRa en el entorno que teníamos configurado hasta ahora entre Omnet e Inet en Ubuntu [FLoRaInstallation18].

Finalmente, una vez realizada toda la integración, 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.

Esta estructura consiste en dos tipos de ficheros. Por un lado, los ficheros NED (Network Description Language), definen y permiten editar el modelo gráficamente y por texto. Por otro lado, un fichero con extensión .ini, proporciona los parámetros para adaptar y configurar los modelos de simulación. Puede editarse tanto gráficamente como por texto, y es el que luego ejecuta Omnet++, permitiendo visualizar la simulación. Los ficheros ini reconocen todos los componentes NED haciendo posible que el usuario añada o modifique parámetros para definir diferentes escenarios. Gracias a esta funcionalidad se han podido simular los distintos despliegues que se presentan a continuación.

### **3.1.2. Simulaciones realizadas**

Una vez llegado a este punto se van a exponer las simulaciones realizadas. Como pequeña introducción, comentar que se ha partido de la infraestructura básica proporcionada por FLoRa, pero modificando los parámetros y características acorde al despliegue que queremos realizar posteriormente de forma real. En cada uno de los apartados siguientes se irán plasmando estas características, además de cómo afecta la variación de ciertos valores según los parámetros que se van estableciendo.

Para ello, se han realizado 4 simulaciones, partiendo desde una simulación bastante simple y sencilla (Simulación 1), en cada simulación posterior se han ido añadiendo variaciones y nuevos elementos, hasta llegar a la simulación final (Simulación 4).

### 3.1.2.1. Simulación 1

ELEMENTOS	PARÁMETROS GENERALES
1 gateway	Distancia nodo-gateway = 20 m
1 nodo LoRa	Despliegue en círculo
	Envío de paquete cada 60s

Tabla 1. Características despliegue 1

Una vez se conocen las características del despliegue, es necesario idear la infraestructura, primero en el simulador y luego plasmándola en el mapa donde se llevará a cabo el despliegue real (Figuras 2 y 3, respectivamente).

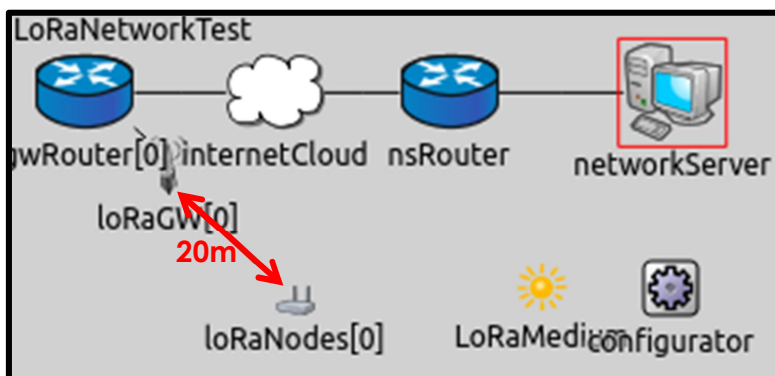


Figura 2. Infraestructura Simulación 1 en el entorno Omnet++

La Figura 2 muestra la primera simulación llevada a cabo. Se trata de un despliegue simple formado por un nodo LoRa (`LoRaNodes[0]`), un gateway (`LoRaGW[0]`) y posteriormente toda la infraestructura de la red (Internet y los routers en cuestión) para hacer llegar la información hasta el servidor (`networkServer`).

Para que esta información llegue hasta dicho servidor, el nodo LoRa adquiere los datos de los supuestos sensores y los envía al gateway, siendo esta comunicación bidireccional. El gateway los recibe en forma de LoRa Frames y es el encargado de convertirlos para enviarlos a la red.

Por su parte la red, gracias al `gwRouter` primero, y al `nsRouter` después, recibe los datos y se encargan de hacerle llegar dichos datos al servidor de red (`networkServer`). El servidor elimina los paquetes duplicados que le llegan y redirige el paquete en cuestión a los servidores de aplicaciones, en caso de que existan. Los dos elementos de la parte inferior derecha, `LoRaMedium` y `Configurator`, son necesarios para que la simulación pueda lanzarse.

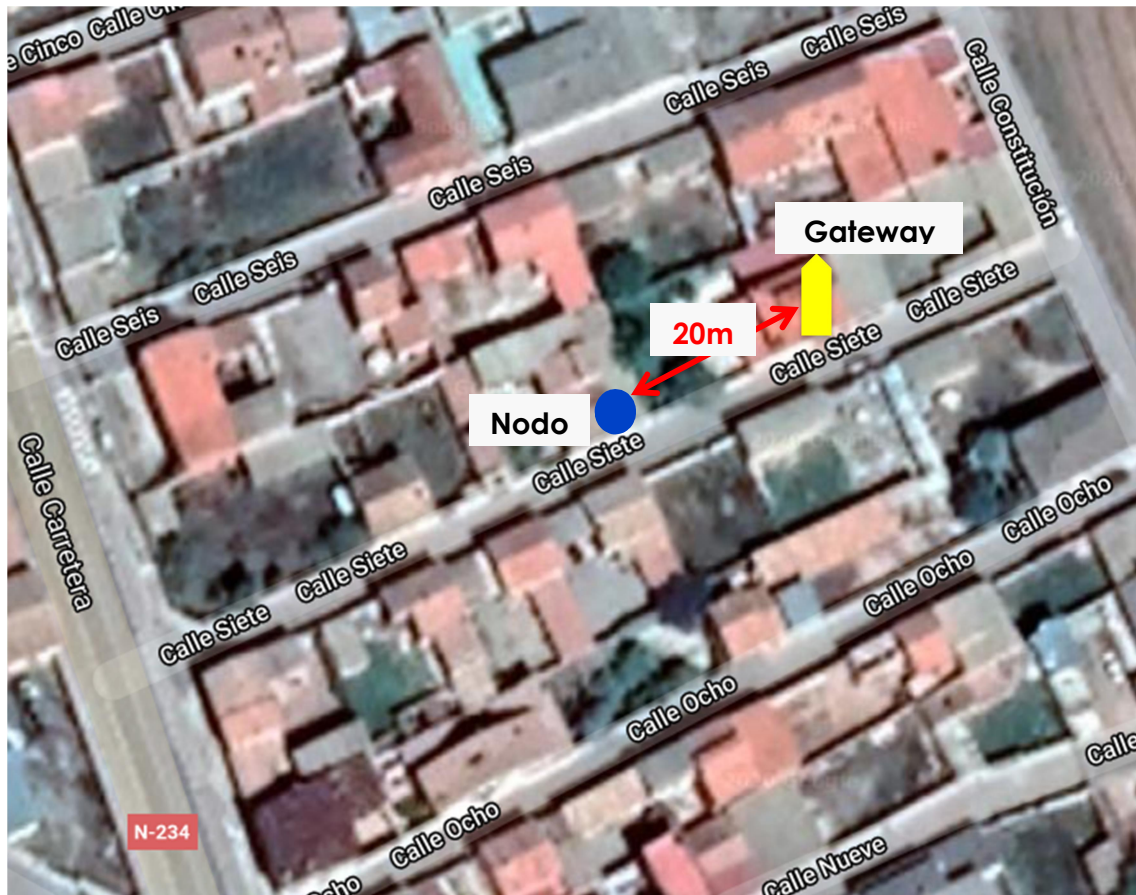
De forma más técnica, el funcionamiento del simulador Omnet++ se basa en el intercambio de mensajes `LoRaAppMessage` y `LoRaMacFrame` con sus respectivos mensajes de solicitud y aprobación. De manera que se va modificando su carga útil para que la información llegue hasta el servidor de red (`networkServer`). El procedimiento es el siguiente:

- `LoRaGW` recibe un mensaje del nodo LoRa



- Lo encapsula en un EthernetIIFrame
- Lo envía a través de la red para que le llegue al Servidor de red

Una vez recibida, se estima el consumo de energía de cada nodo LoRa (en este caso, sólo se dispone de uno) según el tiempo gastado por el módulo de radio LoRa y los valores de los parámetros de configuración que se comentarán en la tabla posterior (Tabla 7).



**Figura 3. Escenario Simulación 1 mapa terreno real (Calle Siete, Villarquemado, Teruel) [GoogleMaps20]**

Tanto para esta primera infraestructura (Simulación 1), aparentemente sencilla, como para las simulaciones restantes, conviene analizar una serie de situaciones variando los parámetros más importantes, con el objetivo de conocer cuál de ellas es la que más interesa llevar a cabo en la realidad.

Para ello se han realizado un conjunto de configuraciones distintas, variando los parámetros que afectan, tanto a la zona de cobertura como a la transmisión y velocidad de los datos (explicados anteriormente en la parte más teórica).



Configuraciones	SF	TP	CR	BW
1	12	20	4	125
2		18		
3		10		
4	10	20		
5		18		
6		10		
7	7	20		
8		18		
9		10		
10	12	20	8	
11		18		
12		10		
13	10	20		
14		18		
15		10		
16	7	20		
17		18		
18		10		
19	12	20	4	500
20		18		
21		10		
22	10	20		
23		18		
24		10		
25	7	20		
26		18		
27		10		
28	12	20	8	
29		18		
30		10		
31	10	20		
32		18		
33		10		
34	7	20		
35		18		
36		10		

Tabla 2. Configuraciones realizadas en cada simulación

Las iniciales usadas en la Tabla 2 se corresponden con:

- **SF**: Entre 7 y 12. Define el área de cobertura, a mayor SF mayor rango, pero velocidad de datos (DR) más baja.
- **TP**: Varía entre 10dBm y 20dBm. Establece la intensidad que usan los nodos LoRa para transmitir las tramas de datos al Gateway. A mayor SF y TP, mayor área de cobertura.
- **CR**: De 4 a 8, proporciona seguridad contra interferencias, a mayor valor, mayor protección.
- **BW**: Ancho de banda de la transmisión. A mayor valor, mayor DR (velocidad de los datos), pero menor sensibilidad (dBm).

Las 36 configuraciones se han realizado en cada una de las simulaciones (de la 1 a la 4), con el objetivo de ir viendo cómo afecta la distancia de los nodos al gateway y cómo influye si se añaden más nodos. Hay que tener en cuenta que no todas las configuraciones, a pesar de lanzarse sin problema, funcionan correctamente, en muchas de ellas dependiendo de los valores elegidos, el gateway no consigue captar los datos enviados por el nodo debido a que los valores de intensidad combinados con el resto de parámetros son demasiado bajos. Por tanto, el área de cobertura que se crea es insuficiente para hacer llegar una buena señal hasta el gateway.

Además, como cada una tiene unas características distintas, es necesario ir viendo como varían los resultados finales y así basar la elección en la que proporcione los resultados óptimos. El propósito final es llegar a una conclusión acertada sobre cuál es la mejor opción para desplegar en la realidad. A continuación se plasman las características de las simulaciones restantes (Tablas 8, 9 y 10, respectivamente).

### 3.1.2.2. Simulación 2

ELEMENTOS	PARÁMETROS GENERALES
1 gateway	Distancia nodo- gateway = 1 km
1 nodo LoRa	Despliegue en círculo
	Envío de paquete cada 60s

Tabla 3. Características despliegue 2

En este caso el despliegue es igual que el anterior, pero ampliando la distancia entre el nodo y el gateway hasta 1 kilómetro (Figura 3).

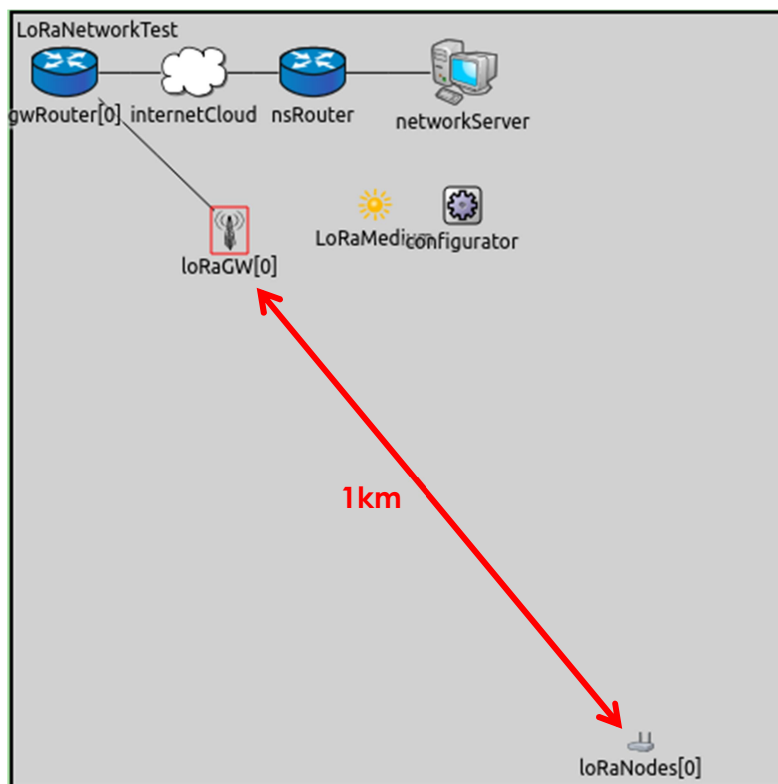


Figura 4. Infraestructura Simulación 2 en el entorno Omnet++

### 3.1.2.3. Simulación 3

ELEMENTOS	PARÁMETROS GENERALES
<b>1 gateway</b>	Distancia nodo- gateway = 1 km
<b>3 nodos LoRa</b>	Despliegue en círculo
	Envío de paquete cada 60s

Tabla 4. Características despliegue 3

Esta simulación parte de la anterior, es decir, se mantiene la distancia de 1 kilómetro entre el nodo LoRa y el gateway, pero además se añaden 2 nodos más (también a una distancia de 1 kilómetro hasta el gateway) como se aprecia en la Figura 3).

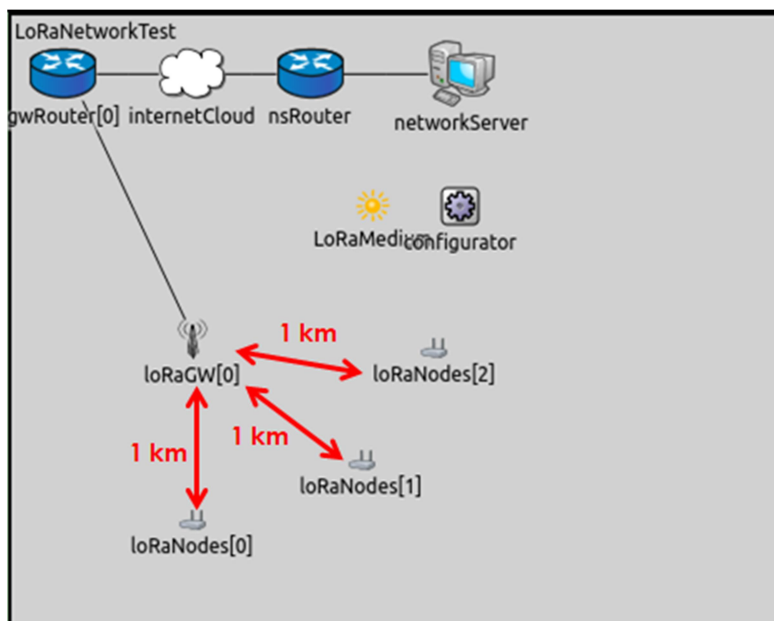


Figura 5. Infraestructura Simulación 3 en el entorno Omnet++

#### 3.1.2.4. Simulación 4

ELEMENTOS	PARÁMETROS GENERALES
1 gateway	Distancia nodo- gateway = 5-10 km
3 nodos LoRa	Despliegue en círculo
	Envío de paquete cada 60s

Tabla 5. Características despliegue 4

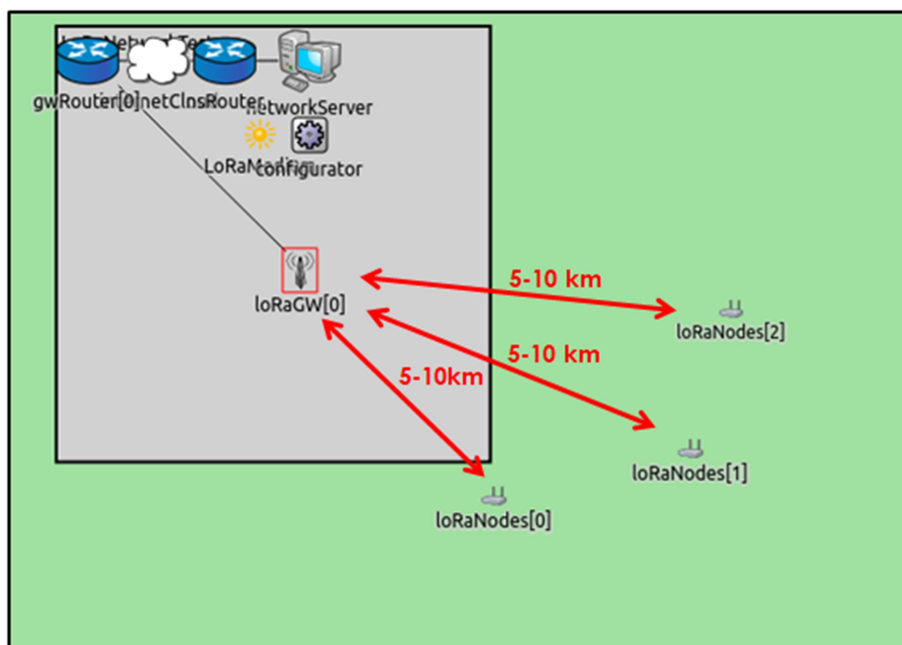


Figura 6. Infraestructura Simulación 4 en el entorno Omnet++

En un principio la idea de esta última simulación consistía en ir aumentando los kilómetros de distancia entre los nodos y el gateway con el objetivo de saber cuánta área de cobertura se podría cubrir. A pesar de que en las especificaciones de LoRa se detalla que podría alcanzar de 5 a 10 kilómetros (en condiciones muy favorables y en un medio sin obstáculos), una vez comprobado con la simulación solamente conseguimos que la máxima distancia entre los nodos y el gateway sea de 3 kilómetros. Por ello, las pruebas realizadas (las distintas configuraciones) se han hecho acorde al escenario de la Figura 7.

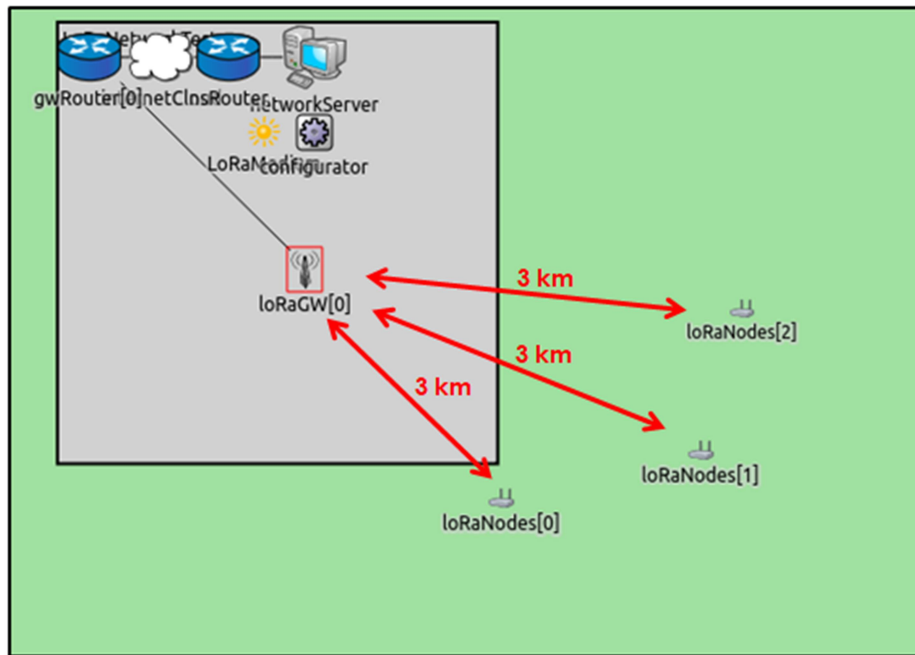


Figura 7. Infraestructura Simulación 4 en el entorno Omnet++

### 3.1.3. Resultados obtenidos

Una vez se han planteado las cuatro simulaciones y las configuraciones que se han llevado a cabo para cada una, conviene analizar los resultados obtenidos. Para ello se va a hacer uso de distintos gráficos según los valores tomados por cada configuración y los parámetros que se pretenden analizar.

#### 3.1.3.1. Energía consumida

En primer lugar, se va a mostrar la energía consumida por los nodos LoRa en cada simulación según las distintas configuraciones, siempre en promedio.

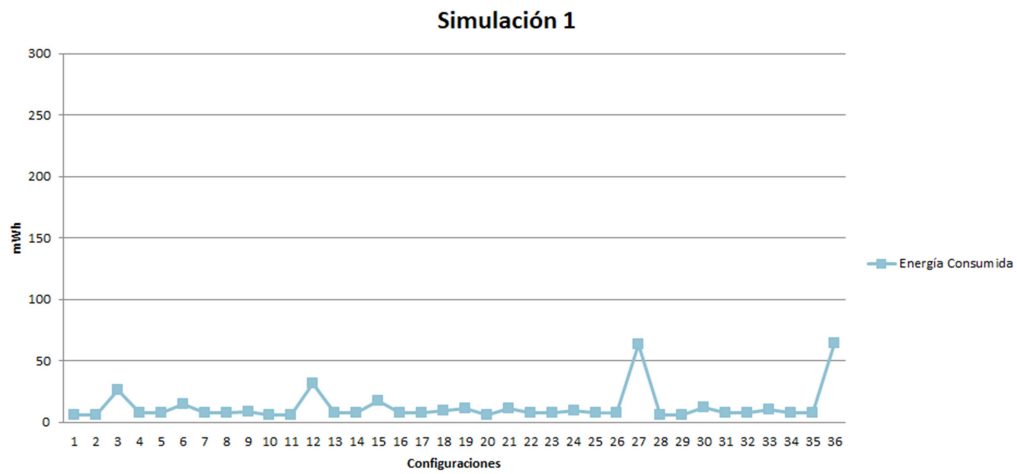


Figura 8. Energía consumida-Sim1

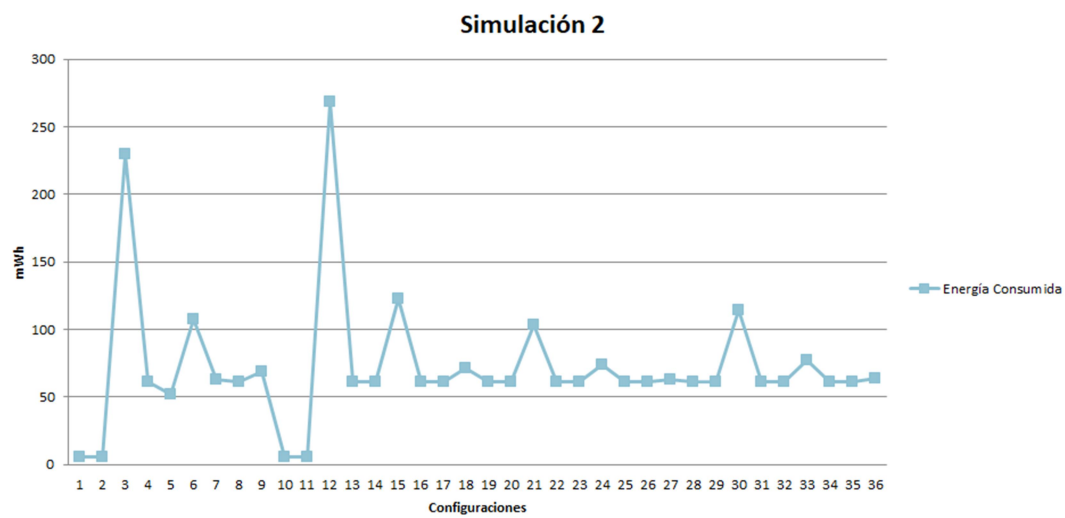


Figura 9. Energía consumida-Sim2

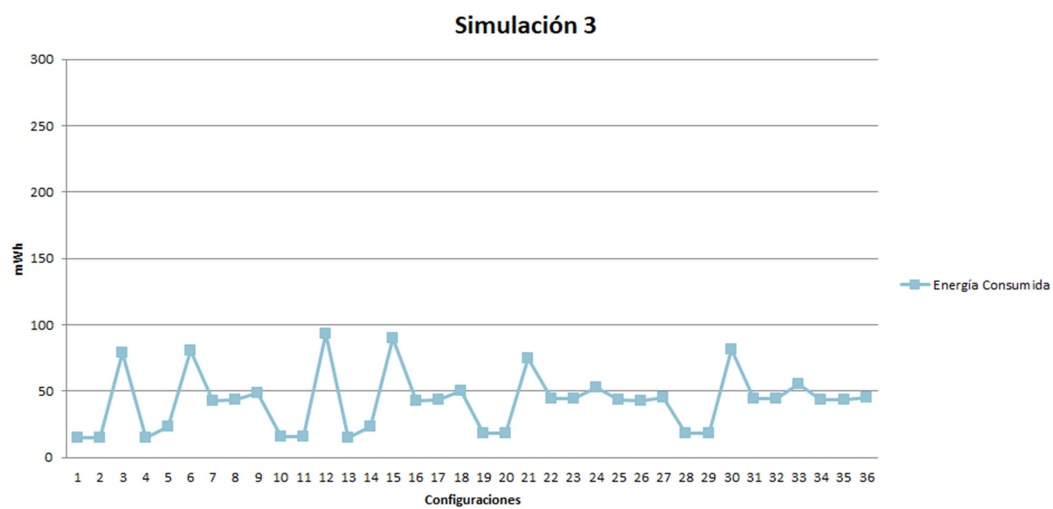
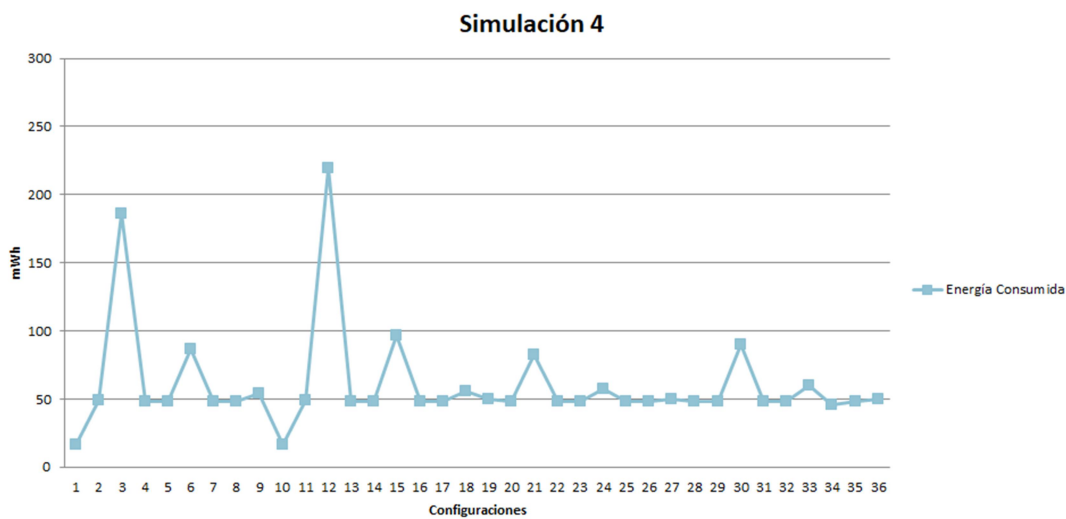


Figura 10. Energía consumida-Sim3



**Figura 11. Energía consumida-Sim4**

Si se analizan los gráficos de las figuras 8, 9, 10 y 11 puede verse una ligera similitud en cuanto a los puntos de mayor consumo en algunas de las simulaciones, cada uno en su medida, pues en la simulación 1 y 2 sólo se emplea un nodo y en las 2 restantes, se hace uso de 3.

Es importante destacar que obviamente la simulación 1 es en la que menos se consume debido a sus condiciones (muy poca distancia y solamente un nodo). Sin embargo, si comparamos las simulaciones 2 y 3, ambas con los nodos situados a 1 kilómetro de distancia del gateway, y con uno y 3 nodos, respectivamente, conviene mucho más la simulación 3, pues la energía consumida es menor.

En cuanto al último gráfico (Figura 11), correspondiente a la simulación 4, se puede ver como la energía consumida aumenta ligeramente respecto a la simulación 3, pero los valores siguen siendo asumibles, y más si se tiene en cuenta que la distancia de los nodos al gateway ha aumentado hasta 3 kilómetros.

### 3.1.3.2. Pérdidas

En segundo lugar, otro aspecto importante a tener en cuenta es la tasa de paquetes perdidos (PER – Packet Error Rate), y con ello, los bits perdidos (BER – Bit Error Rate). Debido a que no se emplea ningún control de errores, para comprobar que aunque muchas veces coincidan PER y BER puede ser porque algún bit sea erróneo, en los siguientes gráficos se plasmará los datos respectivos a los paquetes perdidos (% PER).

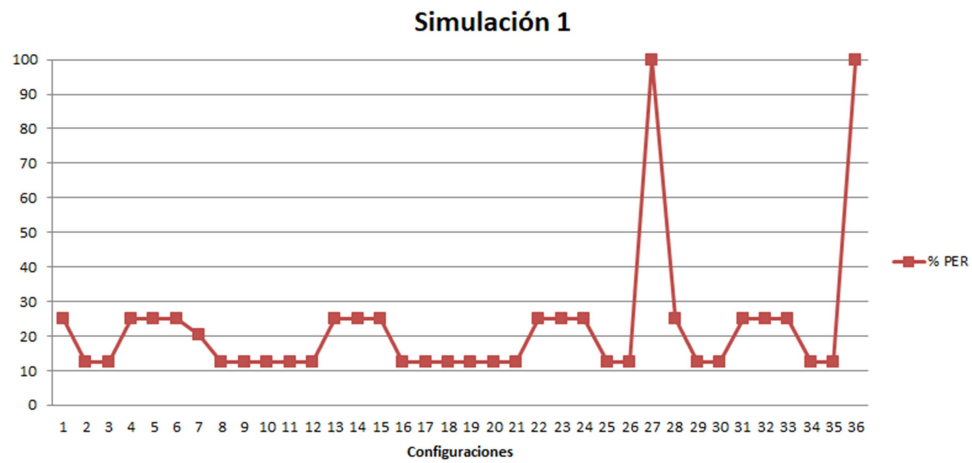


Figura 12. Pérdidas-Sim1

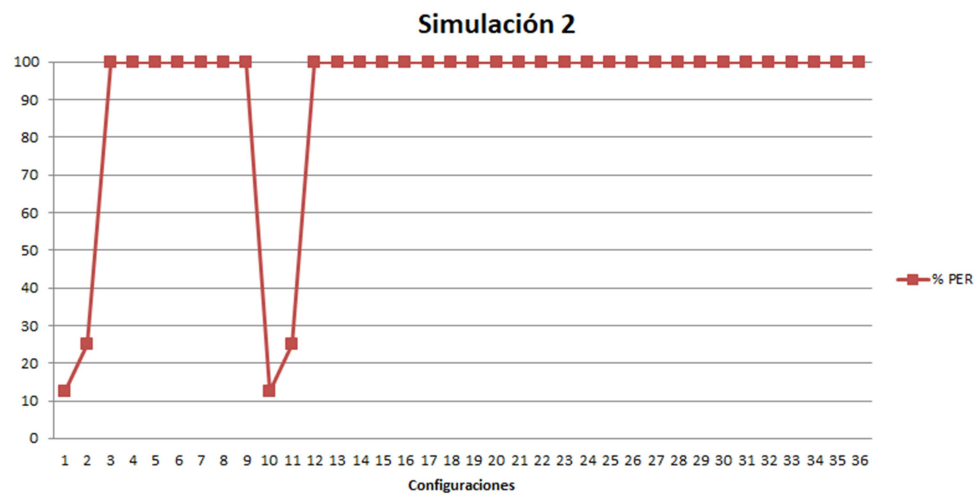


Figura 13. Pérdidas-Sim2

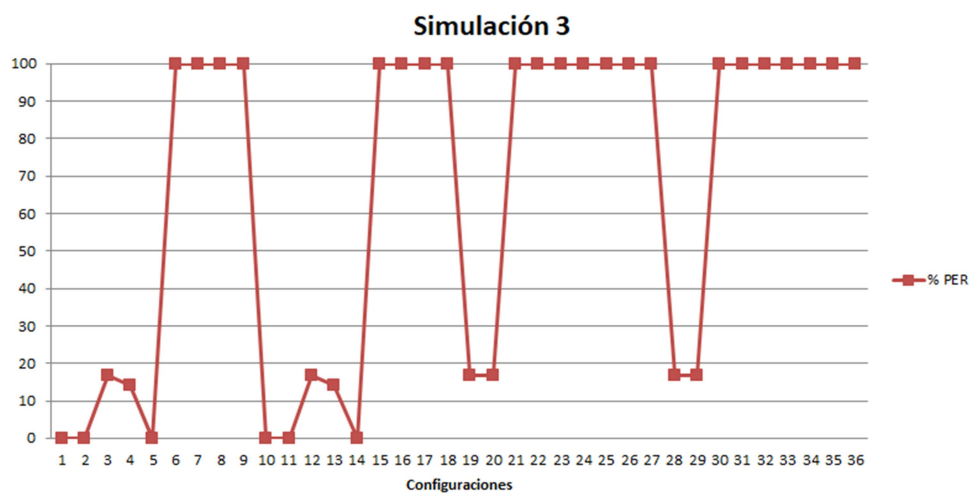
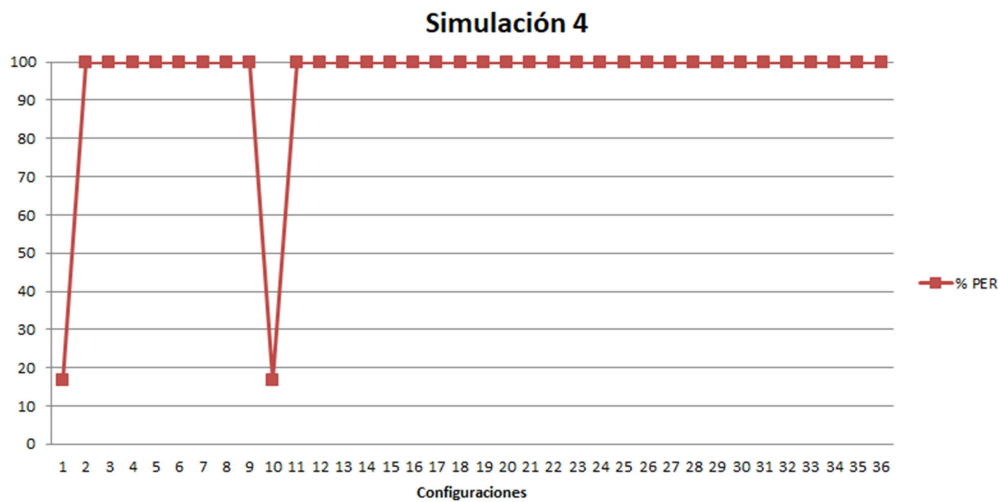


Figura 14. Pérdidas-Sim3





**Figura 15. Pérdidas-Sim4**

Como se puede apreciar en alguna simulación, dependiendo que configuración, las pérdidas son del 100%. Esto se debe a que la información no consigue llegar hasta el gateway, es decir, no se llega a establecer la comunicación entre los nodos LoRa y el gateway, como se ha comentado anteriormente. Se puede ver que estos casos van aumentando desde la primera simulación hasta la última, lo que es normal ya que en la primera la distancia nodo-gateway es mínima, lo que hace que en la mayoría de las configuraciones las pérdidas sean asumibles. Sin embargo a medida que aumentamos la distancia en las simulaciones posteriores, los casos en los que no se llega a establecer dicha comunicación son más notables, pues el área de cobertura se ve afectada por obstáculos e interferencias, llegando incluso a tener solamente 2 configuraciones válidas en la última simulación (Figura 15).

En contraposición, se pueden observar varias configuraciones de la simulación 3 (Figura 14) en las que no se pierde ningún paquete. En la realidad esto no suele ocurrir muy a menudo, ya que casi siempre suele existir una ligera pérdida, pero suele ser tan baja, como ocurre en algunos casos de las simulaciones 1 y 2, que se puede asumir. Para nuestra aplicación no es demasiado crítico que se pierda un bajo porcentaje de paquetes, es decir, son aceptables los valores mínimos que se dan en las simulaciones realizadas, ya que cada 60 segundos se envía la información nuevamente.

### **3.1.3.3. Utilización del canal-Dispositivo**

Finalmente se mostrará el porcentaje de canal utilizado por los distintos dispositivos que intervienen en el proceso desde que el nodo LoRa envía la información hasta que, dicha información llega al servidor.

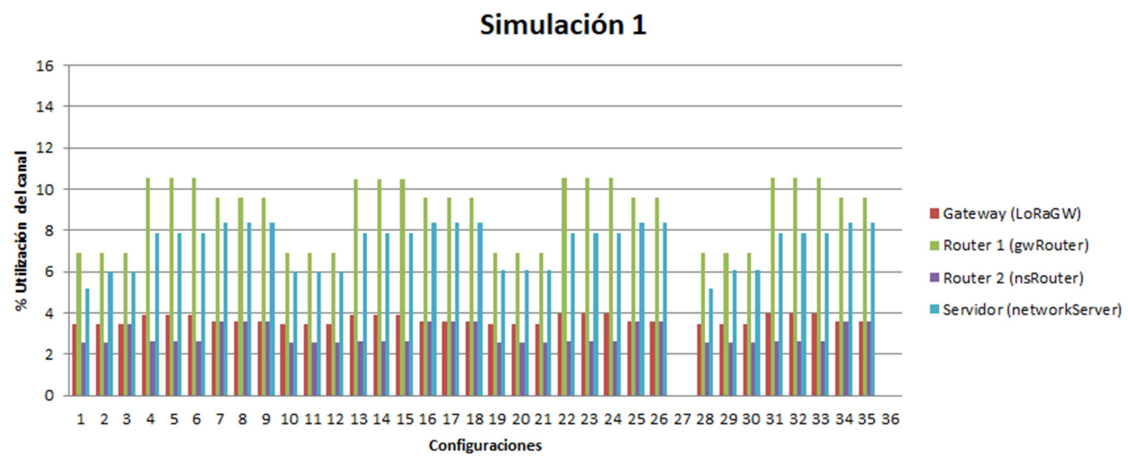


Figura 16. Utilización del canal -Sim1

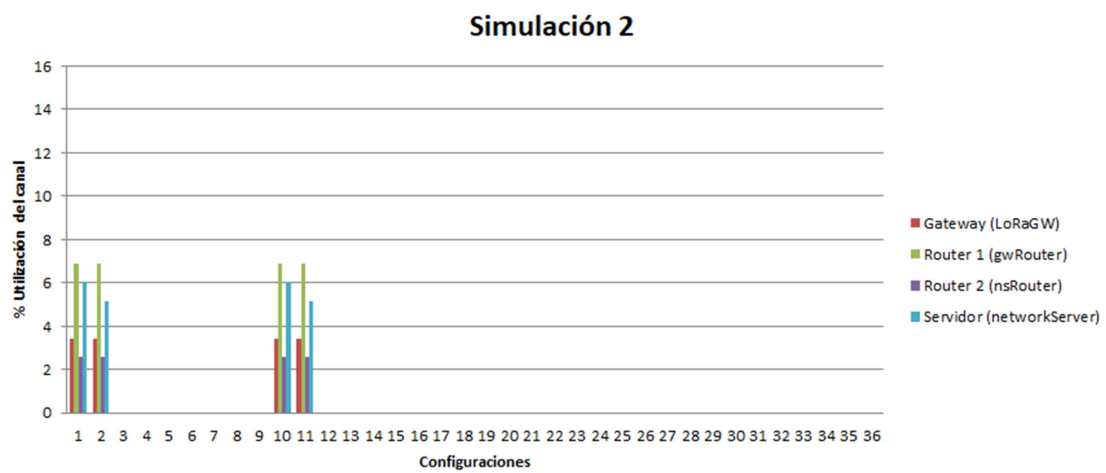


Figura 17. Utilización del canal -Sim2

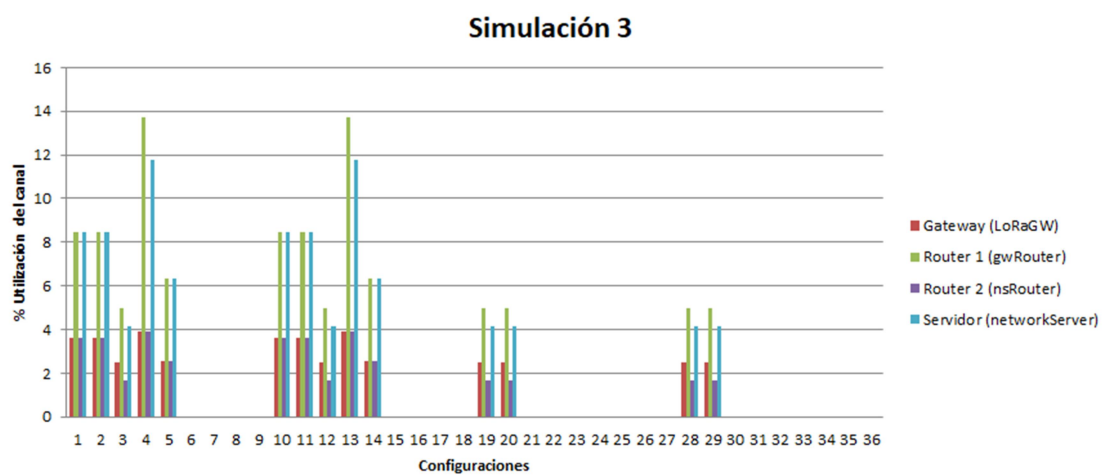
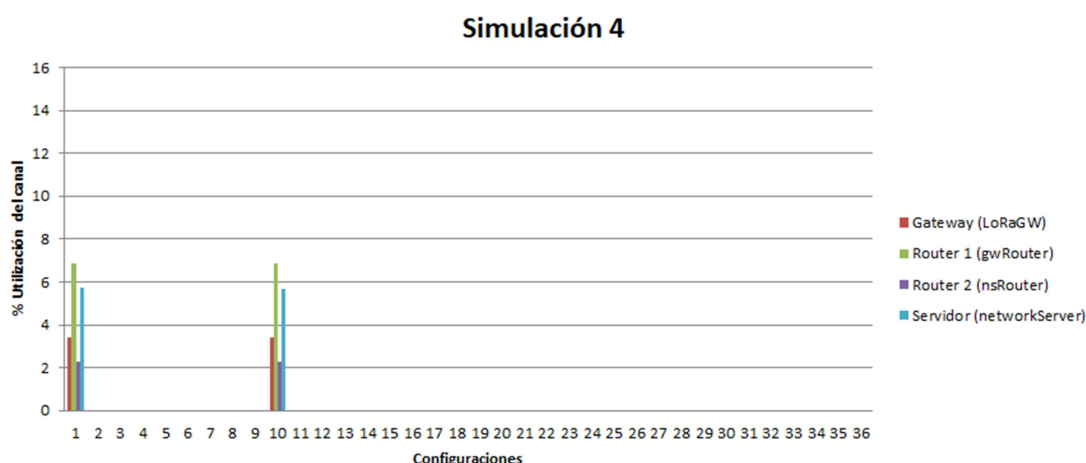


Figura 18. Utilización del canal -Sim3



**Figura 19. Utilización del canal -Sim4**

En este caso, lo más significativo es que en aquellas configuraciones en las que no se llega a establecer la comunicación entre los nodos finales y el gateway, como es obvio, no se emplea el canal. Por eso los valores del resto de dispositivos son nulos.

### 3.1.4. Conclusiones

Por último, se van a analizar los datos visualizados en los apartados anteriores. Como es de esperar, los que interesan son aquéllos en los que la energía consumida por los nodos sea mínima y la tasa de pérdidas sea baja.

Simulación 1		Simulación 2		Simulación 3		Simulación 4	
Config	Energía Consumida (mWh)	Config	Energía Consumida (mWh)	Config	Energía Consumida (mWh)	Config	Energía Consumida (mWh)
1	5,762	1	5,762	1	14,818	1	16,732
2	5,762	2	5,762	2	14,818	2	49,382
10	5,762	10	5,762	10	15,778	10	16,732
11	5,762	11	5,762	11	15,778	11	49,382
20	5,762	20	61,459	20	18,246	20	48,015
28	5,762	28	61,459	28	18,246	28	48,458
29	5,762	29	61,459	29	18,246	29	48,458

**Tabla 6. Mejores valores de Energía consumida por Simulación-Configuración**

Primero, en cuanto a la energía consumida, en la Tabla 6 se ven aquellas configuraciones con los valores más bajos en cada simulación. Si se analizan, la configuración número 1 es la que coincide que contiene los menores valores para todas las simulaciones.

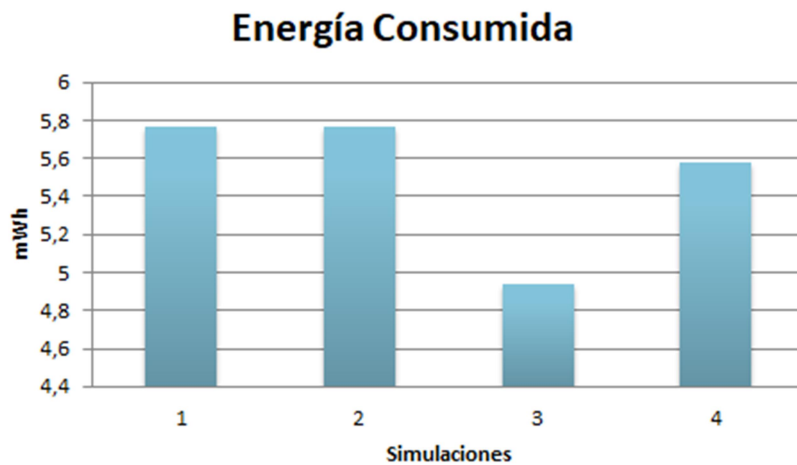


Figura 20. Energía consumida/Simulación para la configuración 1

Como se aprecia, la energía consumida no varía entre las dos primeras simulaciones. Es un aspecto muy positivo, pues se ha aumentado la distancia de 20 metros a 1 kilómetro y el consumo mínimo es el mismo. En cuanto a las simulaciones 3 y 4, teniendo en cuenta que se ha calculado en promedio, se ve una disminución notable. En la 3, se puede ver que LoRa consume mucho menos aún teniendo más nodos, pues en este caso ya se han introducido 2 nodos más, y luego, si se observa la última simulación, con 3 nodos también, a pesar de haber aumentado la distancia 2 kilómetros más, el consumo sigue siendo menor que en las 2 primeras. Sin embargo, esto puede resultar engañoso, ya que puede creerse que a mayor número de nodos menos energía consumida y no es así, ya que aquí también se debe tener en cuenta que esta energía consumida está calculada para 1 hora y debe proporcionarse a través de baterías. De forma que si se realiza una estimación, calculando el coste en baterías que se necesitaría, se puede conocer cual puede resultar más rentable.

Las baterías más apropiadas para este tipo de dispositivos son de 3,7V y 6000mAh, teniendo en cuenta que una de gama media-alta tiene un precio aproximado de unos 21€ y una duración de 12 horas.

Siguiendo los valores de la Figura 19 (energía consumida en mWh) y aplicando el siguiente cálculo: **Wh = (V\*mAh) / 1000**

Se obtiene que cada batería dispone de una energía de **22,2 Wh**

Simulación 1		Simulación 2		Simulación 3		Simulación 4	
Wh	Coste	Wh	Coste	Wh	Coste	Wh	Coste
5,762	5,44€/h	5,762	5,44€/h	14,818	14,01€/h	16,732	15,82€/h

Tabla 7. Coste €/h

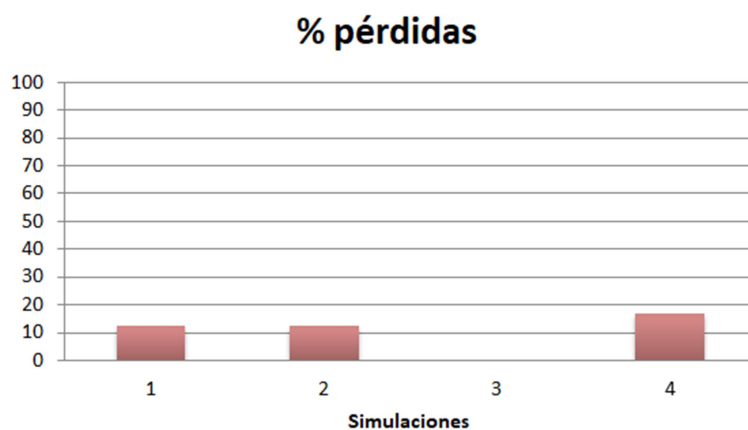
Por tanto, a la larga un mayor número de nodos ocasiona un mayor coste, a pesar de que a priori parezca lo contrario.

Posteriormente, si se procede del mismo modo para analizar la tasa de pérdidas, coincidiendo con las configuraciones que menos energía consumen, los valores mínimos son los mostrados en la Tabla 8. En su mayoría coinciden con los mínimos valores de cada simulación (exceptuando aquellos cuyo valor es del 100%).

Simulación 1		Simulación 2		Simulación 3		Simulación 4	
Config	% PER	Config	% PER	Config	% PER	Config	% PER
1	25	1	12,5	1	0	1	16,667
2	12,5	2	25	2	0	2	100
10	12,5	10	12,5	10	0	10	16,667
11	12,5	11	25	11	0	11	100
20	12,5	20	100	20	16,667	20	100
28	25	28	100	28	16,667	28	100
25	12,5	29	100	29	16,667	29	100

**Tabla 8. Mejores valores de tasa de pérdidas por Simulación-Configuración**

En este caso la configuración en la que coinciden las cuatro simulaciones con la mínima tasa de pérdidas es la número 10.



**Figura 21. Tasa de pérdidas/Simulación para la configuración 10**

Una vez analizados los datos, se puede decir que las configuraciones que más nos interesan son la 1 y la 10, que como se puede ver en la Tabla 9, varían en el nivel de protección contra interferencias, pasando de 4 a 8. Independientemente del número de nodos y de la distancia, pues si se observan los datos en las 4 simulaciones, son las que mejores valores muestran. Por tanto, serán las que se probarán en el despliegue real.

Configuración	SF	TP	CR	BW
1	12	20	4	125
10	12	20	8	125

**Tabla 9. Configuraciones óptimas**

			Energía consumida (mWh)	% PER
Simulación 1	Configuraciones	1	5,762	25
		10	5,762	12,5
Simulación 2		1	5,762	12,5
		10	5,762	12,5
Simulación 3		1	4,939	0
		10	5,259	0
Simulación 4		1	5,577	16,667
		10	5,577	16,667

**Tabla 10. Valores Simulación-Configuraciones óptimas**

### 3.2. DESPLIEGUE REAL

Una vez finalizada la parte de simulación, es conveniente llevarla a la práctica, con el objetivo de ver posibles similitudes o desviaciones al realizar el despliegue en la realidad, pues el principal propósito es ver cómo de cerca está la simulación de la propia realidad.

Se va a comenzar realizando el despliegue correspondiente a la Simulación 1, pero para ello se necesita disponer de los dispositivos correspondientes que intervienen en dicho despliegue, realizar su configuración y por último conseguir que se realice la comunicación entre ellos de forma correcta.

En primer lugar se va a plasmar un pequeño esquema de lo que ha sido este primer despliegue real realizado. Como es obvio es lo mínimo que se puede realizar para empezar a realizar pruebas. Para ello, lo primero es tener claro qué dispositivos se han empleado, cómo se ha realizado su montaje, y por último, cómo se ha conseguido establecer una comunicación entre ellos.

Como se ha podido comprobar anteriormente en los apartados de la parte simulada, en las figuras de los respectivos despliegues se disponen de varios elementos además de los nodos finales y el gateway (Servidor, etc). En el caso del despliegue real, lo que se va a hacer es emplear gateway y nodos (en un primer momento un nodo con un sensor; se comentará con más detalle a continuación) y como servidor desde el que se pueda comprobar y visualizar los resultados se va a hacer uso de The Things Network [TTN], con la vista futura de poder disponer de un servidor propio.

Los nodos son de clase A y se comunican con el gateway a través de ondas de radio haciendo uso de la tecnología LoRaWAN. El gateway a su vez se encarga de enviar los paquetes que recibe a través de Internet al servidor en la nube (TTN). Por último, estos paquetes llegan a una interfaz donde el usuario puede acceder a ellos, disponible también en TTN.

La conexión a la red se hace usando el modo OTAA, pues es el más seguro y además es el recomendado por la propia LoRa Alliance.

### 3.2.1. DISPOSITIVOS UTILIZADOS

Los elementos empleados en el despliegue son:

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

Se trata de un dispositivo que recibe los paquetes de datos enviados por los nodos sensores a través de tecnología LoRa y los transmite vía Internet a un servidor (TTN). En apartados posteriores se mostrará la configuración que se ha realizado y el registro requerido para conectarse con el servidor en cuestión.

La arquitectura de este dispositivo consiste en una Raspberry Pi, una antena, un concentrador y un cable Ethernet (Figura 22, parte izquierda), que posteriormente se suprimió, ya que se usó vía WiFi.

El concentrador es un módulo transmisor/receptor diseñado para recibir paquetes de datos enviados desde distintos dispositivos finales (en este caso los nodos sensores). Para lograr esta conexión LoRaWAN, lleva integrado un chip SX1301, lo que permite construir el nodo gateway LoRa. Posteriormente, se conecta la antena para obtener una correcta recepción de los paquetes de datos (Figura 22, parte derecha); y por su parte la Raspberry Pi funciona como un sistema anfitrión para el concentrador vía SPI. A través de ésta, se alimenta y permite enviar los paquetes de datos al servidor.

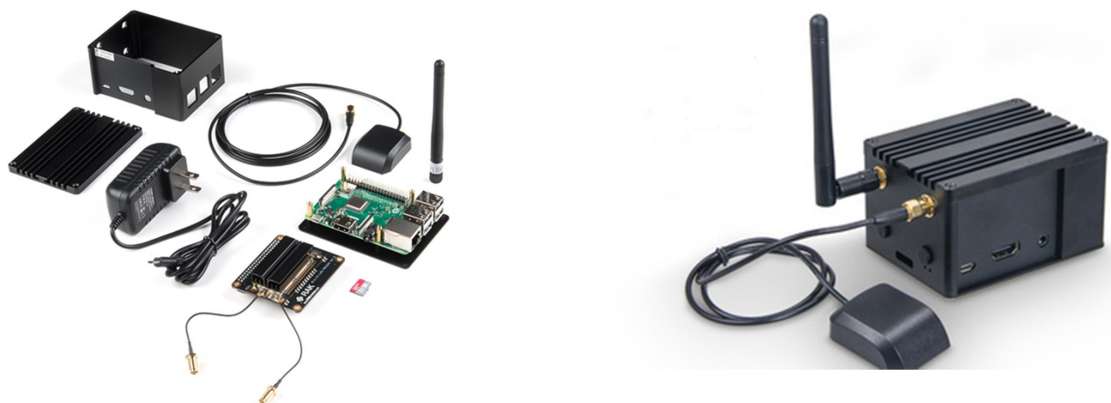
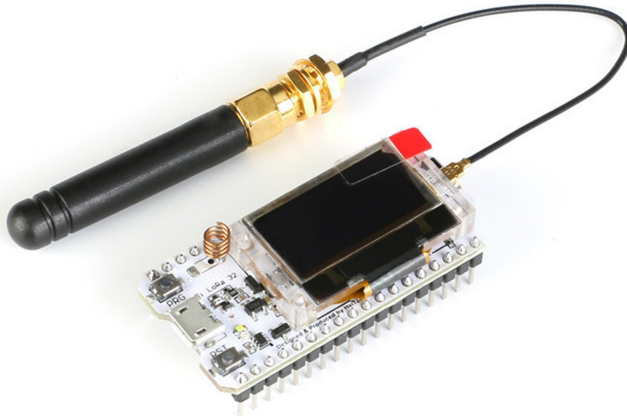


Figura 22. Elementos arquitectura Gateway RAK2245

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

Este dispositivo, junto con el siguiente, constituyen los nodos sensores con los que se va a trabajar. 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 comentado anteriormente).

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.



**Figura 23. Módulo IoT LoRa ESP32 OLED WiFi SX1276 con antena**

Como se aprecia en la Figura 23, 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 principales características técnicas se resumen en la siguiente tabla:

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

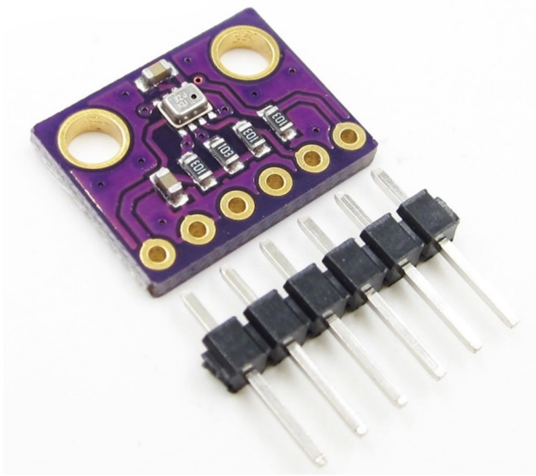
**Tabla 11. Características Módulo IoT LoRa ESP32**



- **Sensor de presión y temperatura I2C SPI BMP280**

Se trata de un sensor barométrico de precisión, que permite medir la presión barométrica y la temperatura con una placa Arduino o Raspberry Pi. Admite tanto conexión por I2C como por SPI, y en cuanto a los datos que consigue obtener, mejora sustancialmente la precisión en  $\pm 1$  hPa en presión y  $1^{\circ}\text{C}$  en temperatura, en comparación con sus versiones anteriores (BMP085 y BMP180).

Además, debido a que la presión varía con la altitud, también se puede usar como altímetro (con una precisión de 1m). Finalmente cuenta con un regulador de voltaje que permite usar desde 3 a 5V DC.



**Figura 24. Sensor barométrico I2C SPI BMP280**

Este dispositivo se conecta al módulo LoRa anterior, constituyendo así, el nodo final capaz de comunicarse con el gateway y enviarle los datos obtenidos.

A continuación, en la Figura 25 se puede ver la disposición inicial de los dispositivos, en la que se ve cómo todos ellos se encuentran ya montados pero a una mínima distancia (aún no se corresponde con el primer despliegue). En la parte izquierda simplemente montados, mientras que en la parte derecha ya se encuentran conectados. Por otro lado en la Figura 26 se aprecian los componentes que forman el nodo LoRa.



Figura 25. Disposición inicial dispositivos

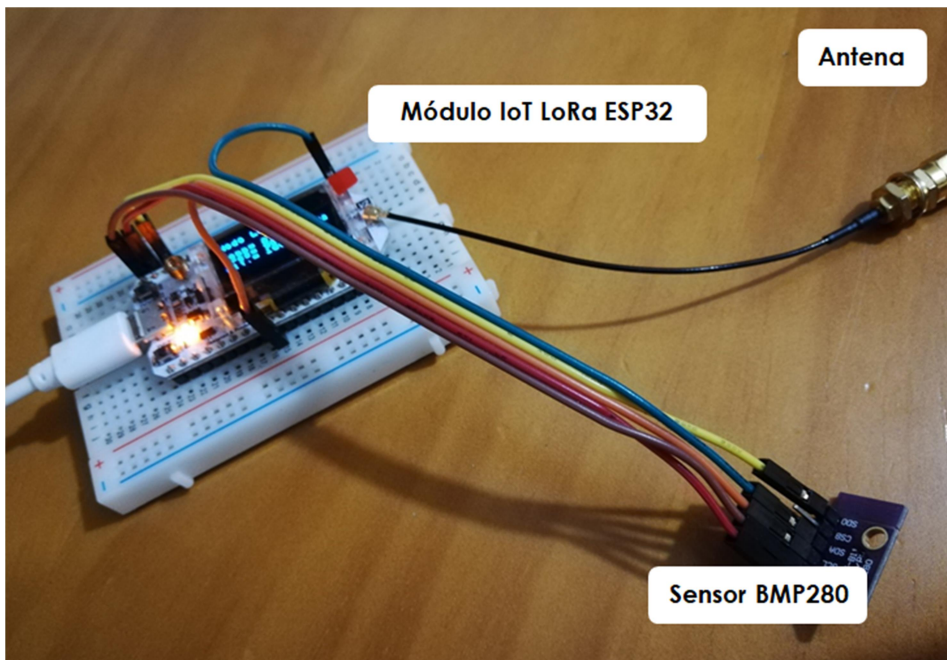


Figura 26. Componentes Nodo LoRa

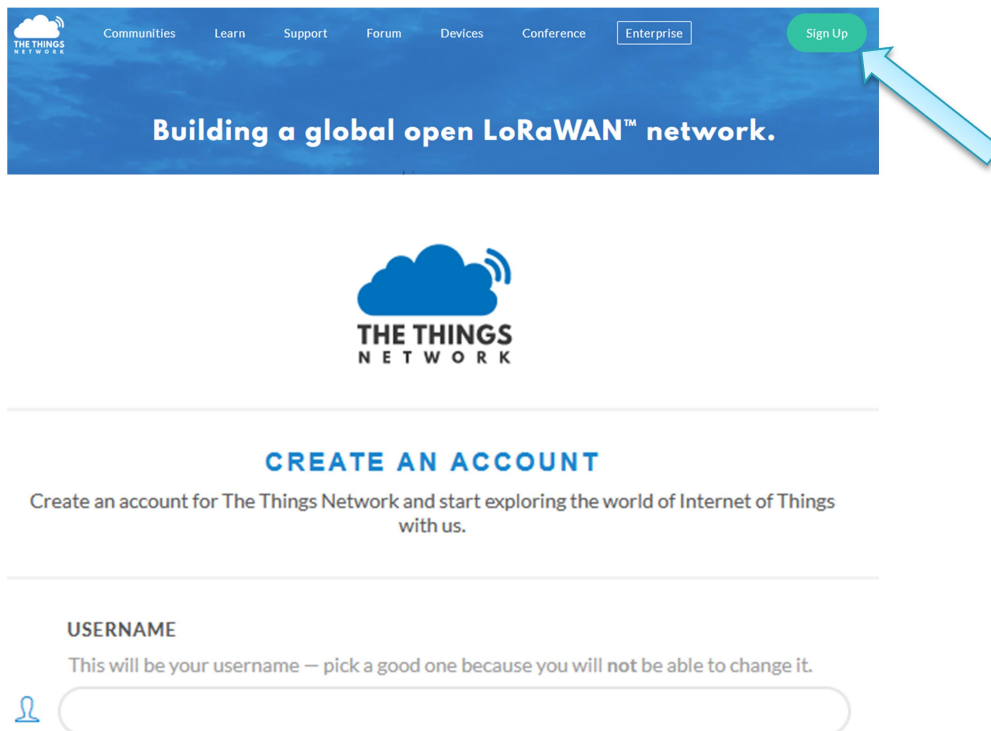
### 3.2.2. CONFIGURACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

Para este primer despliegue se va a hacer uso de The Things Network (TTN), de esta forma se va a poder ir visualizando el registro de los dispositivos y la comunicación entre ellos de forma sencilla y a través de una interfaz amigable.

#### CREACIÓN CUENTA TTN

En primer lugar, es necesario la creación de una cuenta en la propia web de TTN, lo que permitirá acceder a la consola desde donde se administran los

nodos y gateways registrados por el usuario, además de la información que éstos transmiten.



The screenshot shows the top navigation bar of the The Things Network website. The navigation bar includes links for 'Communities', 'Learn', 'Support', 'Forum', 'Devices', 'Conference', and 'Enterprise'. A green 'Sign Up' button is highlighted with a blue arrow. Below the navigation bar is a blue banner with the text 'Building a global open LoRaWAN™ network.' and the The Things Network logo. Below the banner is a section titled 'CREATE AN ACCOUNT' with the text 'Create an account for The Things Network and start exploring the world of Internet of Things with us.' Below this is a form with a 'USERNAME' label and a note 'This will be your username — pick a good one because you will not be able to change it.' The form has a small icon of a person and a text input field.

**Figura 27. Creación cuenta TTN**

## REGISTRO GATEWAY

Una vez se ha accedido a la cuenta, el siguiente paso es registrar el gateway con el que se va a trabajar. Sin embargo, antes es necesario configurar dicho gateway.

Una vez montado el hardware (como se ha visto en la Figura 25), es necesario configurar el software. Simplemente se instala un sistema operativo en la Raspberry Pi, descargado de la propia web oficial y se instala la imagen de disco sistema en la tarjeta microSD que posteriormente se insertará en ella.

Seguidamente se alimenta y se conecta un cable Ethernet para poder configurar los parámetros básicos. Esta configuración puede realizarse, bien conectando la Raspberry a un ordenador y usando un cliente SSH como PuTTY, o bien conectándola a un monitor por HDMI y a un teclado por USB. En este caso se empleó una combinación entre ambas, empleando primero la última opción para activar el SSH y así luego poder acceder desde el ordenador.

Aunque en un primer momento los parámetros se configuraron para emplear el cable Ethernet, posteriormente se modificó la configuración y se activó la WiFi. De esta forma el gateway ya se encuentra en funcionamiento, por lo que se puede proceder a su registro. Antes comentar como dato a destacar el número de gateways registrados en TTN, pues existen 12676 desplegados por

todo el mundo (Figura 28). Sin embargo si se centra el foco en España y concretamente en la provincia de Teruel lo que se puede ver es una gran escasez (Figura 29).



Figura 28. Gateways desplegados a través de TTN

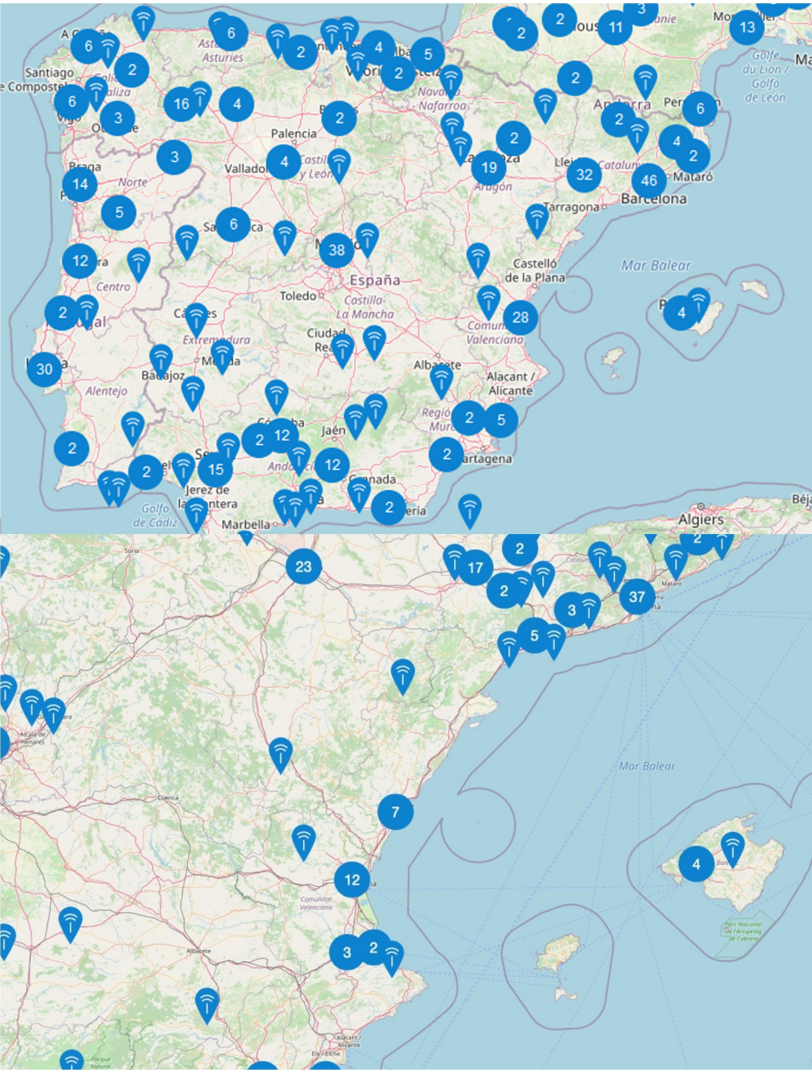
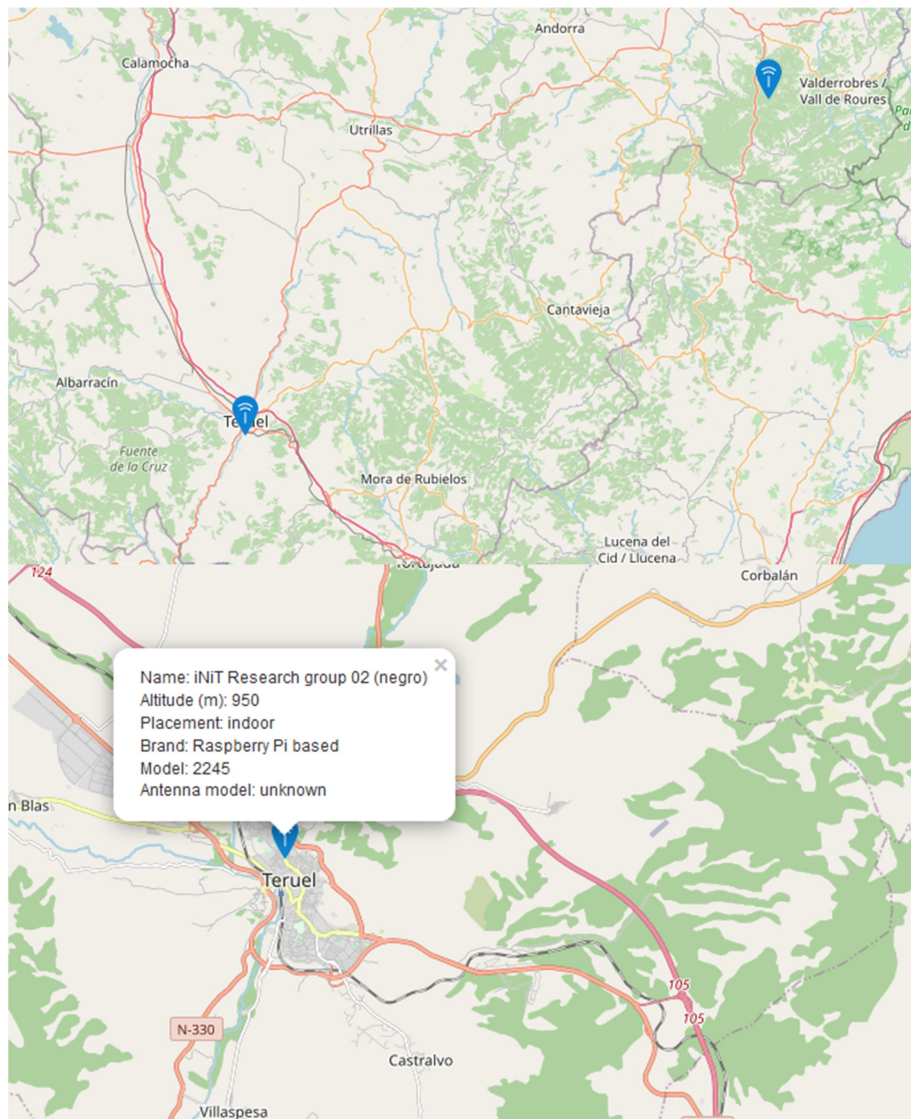


Figura 29. Gateways TTN en España



Concretamente uno de los 2 existentes (Figura 30) se corresponde al que se ha registrado para realizar este TFG.



**Figura 30. Gateways TTN en la provincia de Teruel**

Para llevar a cabo su registro se debe acceder a la consola de la cuenta, en la se muestran 2 bloques (Figura 31). El que interesa en este momento es el de "Gateways". Una vez dentro se debe seleccionar "register gateway" y rellenar los campos que aparecen. Al finalizar el registro, aparecerá en la pestaña "Gateways" todos aquellos que se hayan registrado por el usuario, en este caso aparecerá el que se acaba de registrar y su estado actual, el cual si todo ha ido bien debería ser "connected" (Figura 32).

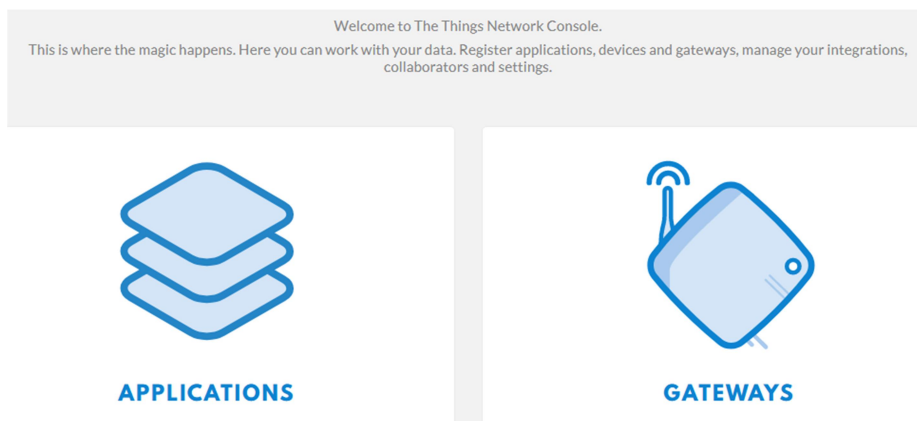


Figura 31. Consola TTN



Figura 32. Gateway registrado

## REGISTRO NODOS SENSORES

El último paso consiste en la preparación de los nodos sensores, primero configurarlos físicamente (apartado anterior) y segundo cargarles el software necesario que les permitirá conectarse y comunicarse en la red.

En primer lugar se debe crear una aplicación en TTN (pestaña “Applications” Figura 31), después de rellenar los campos oportunos ya se podrán registrar los nodos en ella. Se procederá del mismo modo que para el gateway, pero esta vez accediendo a la pestaña “Applications” en la consola de TTN. Una vez creada, aparecerá de la misma forma que el gateway, y pinchando sobre ella se mostrará información de interés sobre ésta, como se puede ver en la Figura 33.

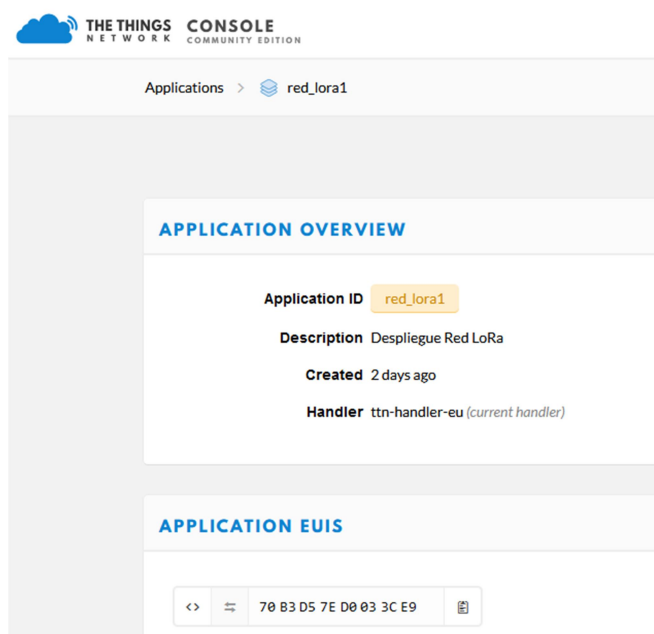


Figura 33. Vista aplicación recientemente creada

En segundo lugar, se debe proceder al registro de los nodos que van a ser utilizados en la red. Pero antes, dichos nodos deben ser programados para que envíen los datos en cuestión.

Primero se va a proceder a la explicación de cómo se ha llevado a cabo la programación de estos módulos IoT LoRa, y posteriormente, cómo han sido registrados en TTN para poder ser visualizados por el gateway.

## **1. Configuración y programación Módulo IoT LoRa ESP32**

El IDE empleado para llevar a cabo la programación de estos módulos ha sido Arduino IDE 1.8.13 [ArduinoIDE], un entorno que permite cargar fácilmente los programas desarrollados en los módulos.

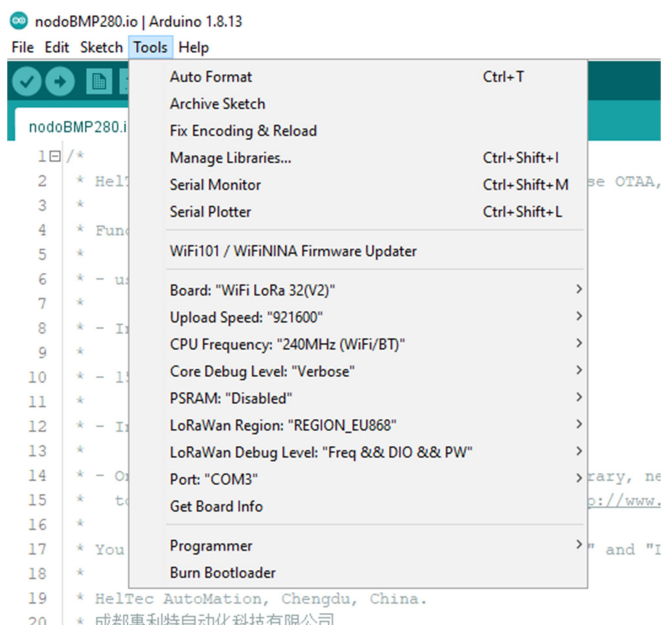
Después siguiendo la documentación de “Heltec ESP32+LoRa Series Quick Start” [HeltecESP32LoRa] para la parte de “Arduino Board Manager” se configura el entorno con las preferencias oportunas para soportar la tecnología LoRa. Esto incluye la configuración de los drivers oportunos, la instalación de librerías determinadas, así como ejemplos de prueba para testear distintos parámetros. Una vez Arduino está configurado y los dispositivos ejecutan correctamente los ficheros de prueba y algún otro fichero que permite comprobar que la tecnología LoRa funciona bien [HeltecWiFiLoRa32], es necesario registrarlos en TTN para asegurarse de que los ficheros con los que se han programado envían los paquetes de datos de forma correcta.

## **2. Registro en la aplicación de TTN**

Lo primero que se necesita saber a la hora de registrar los nodos, es el modelo exacto de dispositivo que vamos a emplear, en este caso es el módulo Heltec LoRa ESP32 con chip SX1276 OLED. Seguidamente se comprueba la configuración en el IDE de Arduino para que los ficheros que se vayan a cargar en los dispositivos se correspondan con el modelo en cuestión (si se ha realizado correctamente el paso anterior, no hace falta hacer ninguna modificación). Finalmente se procede al registro en TTN.

En primer lugar es necesario saber que para poder registrar nuevos nodos en la aplicación de TTN se requiere de una licencia que permita identificar dichos nodos con un identificador único, este proceso se ha realizado siguiendo los pasos de la documentación “Heltec LoRa 32 LoRaWAN Node on The Things Network” [HeltecLoRaWANESP32].

Se instala la librería LoRaWAN para Arduino (ESP32\_LoRaWAN), se selecciona el fichero OTAA.ino y se configura el entorno con los parámetros de la Figura 39 (Board, Región, Puerto, etc).



**Figura 34. Configuración parámetros Arduino IDE**

Seguidamente se conecta el módulo al puerto indicado (COM3) y se ejecuta el siguiente Sketch (Figura 35) para cargarlo en dicho módulo.

```
uint64_t chipid;

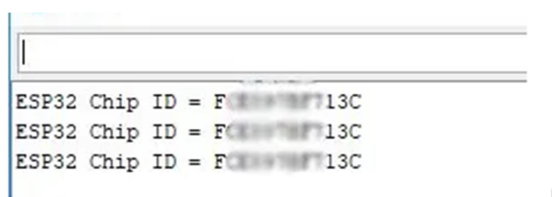
void setup() {
  Serial.begin(115200);
}

void loop() {
  chipid=ESP.getEfuseMac();//The chip ID is essentially its MAC address(length: 6 bytes).
  Serial.printf("ESP32 Chip ID = %04X", (uint16_t) (chipid>>32));//print High 2 bytes
  Serial.printf("%08X\n", (uint32_t) chipid);//print Low 4bytes.

  delay(3000);
}
```

**Figura 35. Sketch license.io**

De esta forma en la consola del entorno aparecerá un mensaje con el identificador que permite obtener la licencia (Figura 36). A continuación, copiando dicho identificador en la página de Heltec [HeltecLicense], obtendremos la licencia en cuestión (Figura 37).



**Figura 36. Consola COM3 Arduino IDE**



Please enter product id:

Confirm

Reset

id	license
B0AD0312CFA4	0xD8604DC3,0x8AD54431,0xBF0059E,0x006E7949

Figura 37. Obtención de la licencia (Web Heltec)

Una vez tenemos la licencia, se debe guardar tanto "id" como "license" para utilizarlos posteriormente. Y ya se puede proceder al registro del dispositivo en TTN. Para ello, dentro de la aplicación creada anteriormente (Figura 33), se debe acceder a la pestaña "Devices", en ella aparecerá un listado con los dispositivos que se han registrado en esta aplicación. En este caso de momento se encuentra vacía, puesto que aun no se ha registrado ninguno, por tanto se selecciona la opción "register device" para incluir el nodo en cuestión. Simplemente se completa como campo de información un identificador para el dispositivo, dejando que el resto de parámetros (DevEUI, AppEUI y AppKey) se completen automáticamente, es decir, son generados por el propio TTN al finalizar el registro del dispositivo.

The screenshot shows the TTN Console interface. At the top, the 'DEVICES' tab is active, with links for 'register device' and 'manage devices'. Below this, a card indicates '1 registered device'. The main content area shows the breadcrumb 'Applications > red\_lora1 > Devices > lora32\_01'. The 'DEVICE OVERVIEW' section for 'lora32\_01' displays the following details:

- Application ID: red\_lora1
- Device ID: lora32\_01
- Activation Method: OTAA
- Device EUI: 00 EB 92 AF 39 9E C4 A2
- Application EUI: 70 B3 D5 7E D0 03 3C E9
- App Key: (masked with dots)

Figura 38. Registro del dispositivo completado

Así, cómo se puede apreciar en la Figura 38, al clicar sobre el dispositivo registrado se puede visualizar información relevante, la cual se empleará a continuación para proceder a la configuración.

Finalmente se ejecuta y se carga en el módulo el Sketch OTAA.io proporcionado por la librería instalada anteriormente, añadiendo en el código la licencia (que se ha debido guardar previamente como se ha comentado) y las claves obtenidas de TTN, DevEUI, AppEUI y AppKey (Figuras 38 y 39). Si todo va bien, en TTN aparecerá el nodo ya registrado, conectado y enviando paquetes al gateway (Figura 40).

```
/*license for Heltec ESP32 LoRaWan, quarry your ChipID relevant license: http://resource.heltec.cn/search */
uint32_t license[4] = {0x78210002, 0x900000A9, 0x6700001F, 0xCC6F5B1F};

/* OTAA para*/
uint8_t DevEui[] = { 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 };
uint8_t AppEui[] = { 0x70, 0x00, 0xD5, 0x70, 0x00, 0x00, 0x30, 0xE0 };
uint8_t AppKey[] = { 0x20, 0xB0, 0xF0, 0x20, 0x00, 0xE0, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 };
```

Figura 39. Código añadido al Sketch OTAA.io

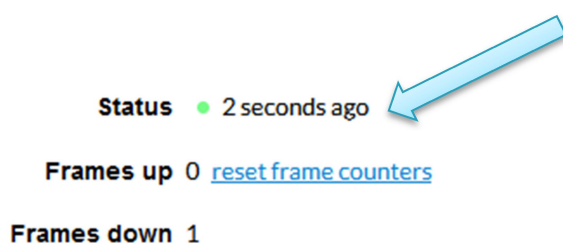


Figura 40. Nodo en funcionamiento

### 3.2.3. COMUNICACIÓN Y TESTEO

Llegado este punto, los dispositivos se encuentran configurados y funcionando correctamente. Los paquetes enviados por el nodo LoRa llegan al gateway y todo ello se puede visualizar a través de la consola proporcionada por TTN. En la Figura 41 la parte superior se corresponde con el gateway, mientras que la inferior hace referencia a los paquetes que va enviando el nodo. Coincidiendo en ambas.

Comentar que estos datos se corresponden con una primera prueba en la que los dispositivos se encuentran situados a centímetros (Figura 25). Por tanto, ahora se va a plasmar el despliegue real que se ha llevado a cabo.

THE THINGS

NETWORK

CONSOLE

COMMUNITY EDITION

Applications

Gateways

Gateways

>

eui-b827ebffe22d77d

>

Traffic

beta

▼

12:10:10

867.9

lora

4/5

SF 7 BW 125

41.2

14

dev addr: 26 01 25 51

payload size: 12 bytes

▲

12:10:09

867.9

lora

4/5

SF 7 BW 125

51.5

14

dev addr: 26 01 25 51

payload size: 17 bytes

▼

12:09:55

867.7

lora

4/5

SF 7 BW 125

41.2

13

dev addr: 26 01 25 51

payload size: 12 bytes

▲

12:09:55

867.7

lora

4/5

SF 7 BW 125

51.5

13

dev addr: 26 01 25 51

payload size: 17 bytes

▲

12:10:09

14

2

confirmed

payload: 00 01 02 03

▼

12:09:53

0

▲

12:09:55

13

2

confirmed

payload: 00 01 02 03

▼

12:09:37

0

Figura 41. Visualización del tráfico de paquetes entre Gateway y nodo LoRa (Consola TTN)

3.2.4. DESPLIEGUE 1

El primer despliegue que se va a realizar se corresponde con la simulación 1, el gateway está separado a una distancia de 20 metros respecto del nodo. Ya se introdujo en el apartado de las simulaciones, la colocación de los dispositivos (Figura 2) desde una perspectiva satélite de la zona, sin embargo también se ha querido plasmar la colocación del nodo desde otra perspectiva (Figura 42). En este caso el nodo hace uso de una batería y se encuentra situado en la acera, pues al ser 20 metros todavía no se consigue llegar a ningún terreno agrícola o ganadero.



Figura 42. Nodo sensor-Despliegue 1

Al concluir el apartado de las simulaciones, se pudo apreciar que las configuraciones óptimas de todas las realizadas se correspondían con la 1 y la 10 (Tabla 14). Este primer despliegue se va a configurar con los parámetros de la configuración 1 (SF=12; TP=20; CR=4; BW=125).

La idea es visualizar los resultados que se obtienen para poder compararlos con la simulación realizada, así como posibles parámetros interesantes que se comentarán a continuación y que influyen en la comunicación entre dispositivos. El despliegue está diseñado de tal manera que el nodo enviará los datos de la temperatura, la presión y la altitud que vaya registrando cada minuto. Además estos datos se irán mostrando en la pantalla del módulo IoT al mismo tiempo que se envían.

En cuanto al contenido de los paquetes (payload), TTN permite desglosarlos e ir viendo los parámetros que interesan. En la consola del gateway además de los datos generales (Figura 43), se puede visualizar la estructura de la carga de cada paquete recibido (Figura 44).

time	frequency	mod.	CR	data rate	airtime (ms)	cnt	
▲ 21:51:56	867.9	lor	4/5	SF 7 BW 125	46.3	29	dev addr: 26 01 25 61 payload size: 15 bytes

**Figura 43. Paquete recibido por el gateway (Consola TTN)**

```
{
  "gw_id": "eui-b827ebfffe22d77d",
  "payload": "gGE1ASaAHQACZIYvcs7/",
  "f_cnt": 29,
  "lor": {
    "spreading_factor": 7,
    "bandwidth": 125,
    "air_time": 46336000
  },
  "coding_rate": "4/5",
  "timestamp": "2020-08-28T19:51:56.262Z",
  "rssi": -67,
  "snr": 8.8,
  "dev_addr": "26012561",
  "frequency": 867900000,
  "bmp280": {
    "temperature": 27.79,
    "pressure": 896.63,
    "altitude": 1076.42
  }
}
```

**Figura 44. Desglose del paquete recibido**

Los parámetros en cuestión son:

- **gw\_id**: identificador del gateway
- **payload**: carga recibida
- **f\_cnt**: número de paquete recibido
- **lor**: parámetros fundamentales de la tecnología LoRa (explicados en la primera parte del documento)
  - **spreading\_factor**
  - **bandwidth**
  - **air\_time**
- **coding\_rate**
- **timestamp**: instante de tiempo en el que se ha recibido el paquete
- **rssi**: potencia de señal recibida (dBm). Se trata de un valor negativo y es mejor cuanto más cerca del 0 se encuentre.

- **snr**: ratio entre la potencia de señal recibida y el nivel de potencia del noise floor, siendo éste el área en la que se concentran todas las señales e interferencias no deseadas que pueden corromper la señal transmitida.
- **dev\_addr**: dirección del dispositivo que ha enviado el paquete, en este caso el nodo LoRa
- **frequency**: frecuencia en la que se está transmitiendo (dentro de la banda europea)
- **bmp280**: datos del paquete que han sido obtenidos por el sensor del nodo
  - **temperatura**: temperatura
  - **pressure**: presión
  - **altitude**: altitud

Una vez se conocen los parámetros de cada paquete que va a recibir el gateway, conviene comprobar que se corresponden con los que envía el nodo (Figura 45).

```
{
  "time": "2020-08-28T19:51:56.262Z",
  "frequency": 867.9,
  "modulation": "LORA",
  "data_rate": "SF7BW125",
  "coding_rate": "4/5",
  "bmp280": {
    "temperature": 27.79,
    "pressure": 896.63,
    "altitude": 1076.42
  }
  "gateways": [
    {
      "gtw_id": "eui-b827ebfffe22d77d",
      "timestamp": 3937016907,
      "time": "",
      "channel": 0,
      "rssi": -67,
      "snr": 8.8
    }
  ]
}
```

**Figura 45. Desglose del paquete enviado por el nodo**

Para elaborar los paquetes de esta forma es necesario introducir distintos trozos de código en los sketches de Arduino que se cargan posteriormente en el módulo. Los más destacados se muestran en las siguientes figuras:

```
Adafruit_BMP280 bme; // I2C

uint32_t temperature = bme.readTemperature();
uint32_t pressure = bme.readPressure()/100;
uint32_t altitude = bme.readAltitude(1020.25);
```

**Figura 46. Código que obtiene los datos del sensor BMP280**

```

u8x8.begin();
u8x8.setFont(u8x8_font_chroma48medium8_r);

u8x8.drawString(0, 1, "Nodo LoRa 1\n ");

SPI.begin(SCK,MISO,MOSI,SS);
Mcu.init(SS,RST_LoRa,DIO0,DIO1,license);

LoRa.setSpreadingFactor(12);
deviceState = DEVICE_STATE_INIT;

```

Figura 47. Código de la función setup() para inicializar los parámetros

```

void loop()
{
    switch( deviceState )
    {
        case DEVICE_STATE_INIT:
        {
            LoRaWAN.init(loraWanClass,loraWanRegion);
            break;
        }
        case DEVICE_STATE_JOIN:
        {
            LoRaWAN.join();
            break;
        }
        case DEVICE_STATE_SEND:
        {
            prepareTxFrame( appPort );
            LoRaWAN.send(loraWanClass);

            u8x8.drawString(0, 3, "Temp=");
            u8x8.setCursor(6, 3);
            u8x8.print(bme.readTemperature());
            u8x8.drawString(12, 3, "C");
        }
    }
}

```

Figura 48. Parte del código de la función loop()

El último paso consiste en analizar la información obtenida para ver lo que se aproxima este despliegue real al simulado. Los datos se muestran en las siguientes tablas.

En primer lugar, la Tabla 12 muestra un promedio de los datos enviados por el nodo en una hora, de manera que los 6 valores que se ven se corresponden con una media calculada, de tal forma que cada fila hace referencia a la media de 10 paquetes (puesto que cada 10 minutos se reciben 10 paquetes).

DESPLIEGUE 1							
RSSI (dBm)	SNR	AIR TIME (ms)	FRECUENCIA (MHz)	SF	BW (KHz)	CR	PAYLOAD SIZE (Bytes)
-118	-0,2	164,9	867,7	9	125	4	15
-121	-2	164,9	867,3	9	125	4	15
-117	3,2	164,9	868,3	9	125	4	15
-118	4,2	164,9	867,9	9	125	4	15
-124	-6,8	164,9	867,5	9	125	4	15
-121	-1,2	164,9	868,1	9	125	4	15

**Tabla 12. Promedio datos paquetes/hora – Despliegue 1**

En segundo lugar, con los datos respectivos al sensor se ha procedido de la misma forma. Se ha calculado la media obteniendo 6 valores correspondientes al tiempo de 1 hora (Tabla 13).

Temperatura (C)	Presión (hPa)	Altitud (m)
17,68	896,23	1077,02
18,92	896,55	1076,91
17,48	896,5	1076,95
18,27	896,52	1077,02
17,7	896,61	1077,01
17,56	896,57	1076,98

**Tabla 13. Promedio datos sensor/hora – Despliegue 1**

Como dato a destacar, comentar que ha sido necesario disminuir el Spreading Factor (SF) desde 12 a 9, para que la comunicación se estableciera correctamente. Un punto en contra, pues el simulador no daba problemas a la hora de emplear un SF de 12 con el resto de parámetros de esta configuración.

En cuanto al resto de parámetros (Tabla 12), tanto la frecuencia (ya que es obvio que se va a desplazar dentro de la banda europea) como el tiempo que viaja la señal por el aire (Air Time) se mantiene. Sin embargo, destaca la variación del RSSI y del SNR, ya que depende de las interferencias que se estén dando en cada momento. Además, hay que tener en cuenta que cuanto más próximos a 0 sean los valores, mejor, pero en este caso hay que contar con los obstáculos que existen en el recorrido de la señal, lo que influye notablemente en su valor.

En las dos gráficas siguientes (Figuras 49 y 50 respectivamente) se ve claramente cómo el SNR depende de los valores del RSSI, ya que la curva es similar.



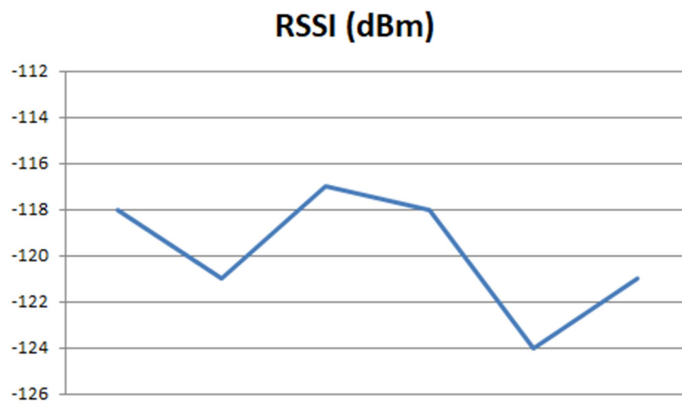


Figura 49. Variación RSSI-Despliegue1

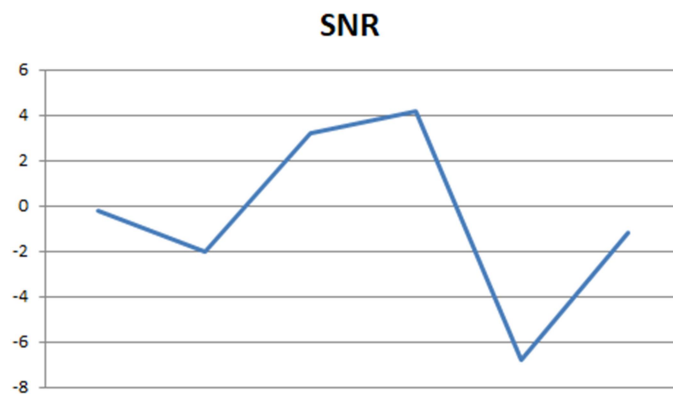


Figura 50. Variación SNR-Despliegue1

### 3.2.5. DESPLIEGUE 2

En este segundo despliegue, se ha aumentado la distancia que separa el gateway del nodo a 1 kilómetro, correspondiéndose así con la simulación 2. En las figuras posteriores se puede observar un mapa satélite de la zona en cuestión y la disposición del nodo en el terreno elegido, respectivamente.

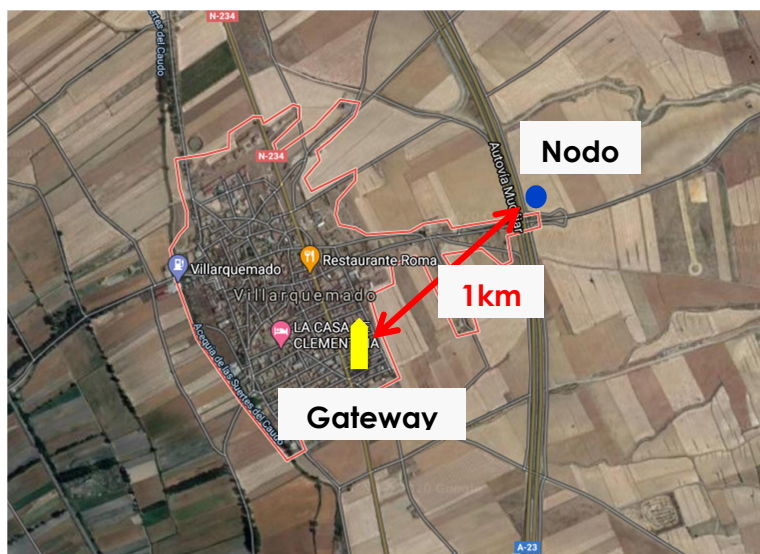


Figura 51. Mapa satélite – Despliegue 2





**Figura 52. Nodo sensor-Despliegue 2**

Tanto los paquetes enviados como los sketches cargados en el nodo, son idénticos a los explicados en el apartado del Despliegue 1. Del mismo modo, la configuración probada es la misma (Configuración 1). Por tanto, el objetivo es analizar la variación de los parámetros analizados en el despliegue anterior, ya que ahora la distancia ha sido aumentada hasta 1 kilómetro. Se ha procedido de la misma forma que en el despliegue anterior para obtener los resultados, los cuales se pueden visualizar en las tablas siguientes:

DESPLIEGUE 2							
RSSI (dBm)	SNR	AIR TIME (ms)	FRECUENCIA (MHz)	SF	BW (KHz)	CR	PAYLOAD SIZE (Bytes)
-120	-3	164,7	868,5	9	125	4	15
-124	-5,2	164,8	867,3	9	125	4	15
-120	-1	164,9	868,1	9	125	4	15
-122	-1,2	329,7	867,1	10	125	4	15
-121	-1	329,7	868,5	10	125	4	15
-125	-1,8	329,7	867,1	10	125	4	15

**Tabla 14. Promedio datos paquetes/hora – Despliegue 2**

Temperatura (C)	Presión (hPa)	Altitud (m)
24,96	893,72	1084,69
24,46	895,73	1084,56
24,36	895,77	1084,18
24,38	895,74	1084,5
24,4	895,75	1084,16
24,35	895,78	1084,28

**Tabla 15. Promedio datos sensor/hora – Despliegue 2**

En este caso, respecto al SF ha ocurrido como antes, pero esta vez se ha podido realizar algunos envíos llegando a 10 como valor máximo de SF. Lo que en el simulador se hacía con 12 sin problema, es decir, se corresponde con la configuración 1 pero con un SF de 10. Observando el resto de parámetros, en este despliegue sí que existe más variación en el tiempo que se encuentra la señal en el aire, y esto es debido tanto al aumento del Spreading Factor como a la distancia. Sin embargo, esta vez la diferencia de valores entre los distintos RSSI y SNR es más pequeña. Se puede apreciar en las figuras siguientes.

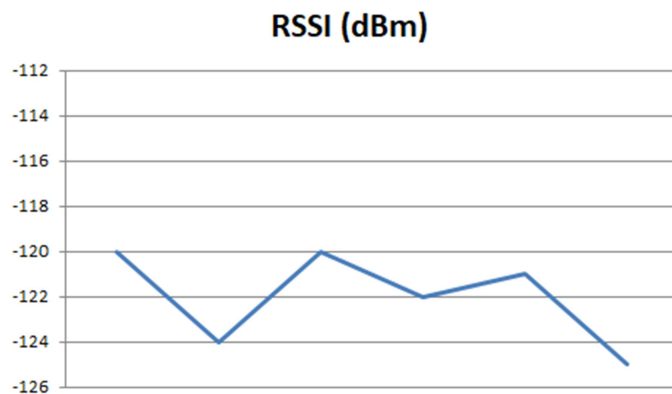


Figura 53. Variación RSSI-Despliegue2

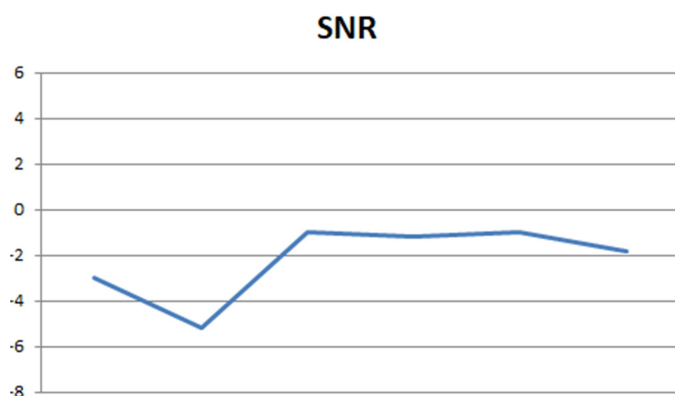


Figura 54. Variación SNR-Despliegue2

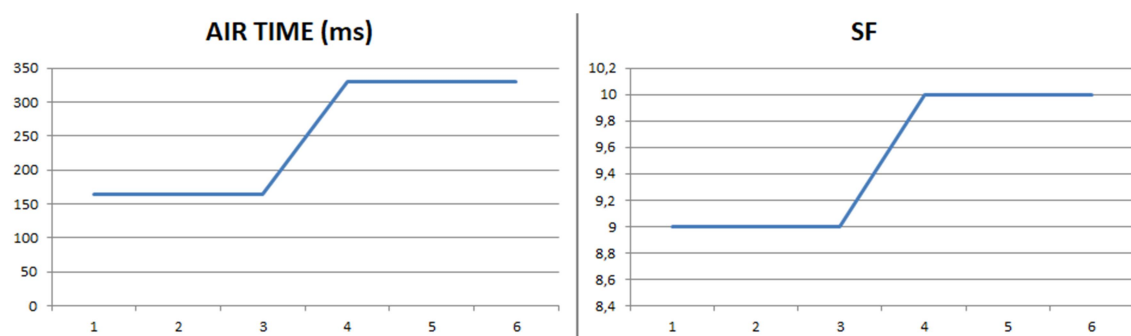


Figura 55. Relación AirTime-SF

### 3.3. COMPARATIVA

En este apartado final se comentará de forma conjunta tanto la energía consumida como las pérdidas de paquetes que se ocasionan en los despliegues en cuestión, con el objetivo de realizar una pequeña comparación con los resultados del apartado de simulaciones.

En primer lugar, se analizará la energía consumida. Cada nodo, según las especificaciones, consume aproximadamente 0,003mWh, valor que puede aumentar o disminuir en función de lo que le cueste establecer la comunicación con el gateway. En la Figura 56 se puede ver el consumo ocasionado por cada despliegue, por tanto, entrando en comparación con las simulaciones realizadas (Figura 19), en el despliegue real el consumo es ligeramente menor.

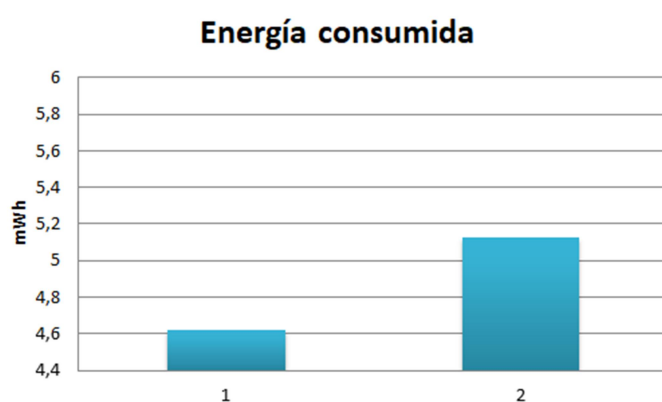


Figura 56. Energía consumida/Despliegue

En cuanto a la tasa de paquetes perdidos (PER), se medirá en porcentaje, del mismo modo que en apartados anteriores. Se ha comprobado que el despliegue 1, tiene un 0% de pérdidas, pues en las sucesivas pruebas realizadas, todos los paquetes consiguen llegar al gateway. Esto es debido a que la distancia entre los dispositivos no es demasiado grande y por ello las interferencias son mínimas. En el despliegue 2, al aumentar esta distancia, la tasa de paquetes perdidos aumenta mínimamente.

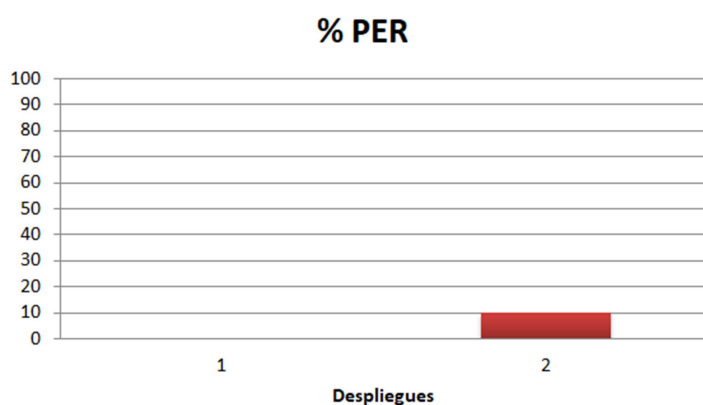


Figura 57. Tasa pérdidas/despliegue

Si se establece una comparativa con los resultados obtenidos en la parte simulada, es decir, las pérdidas de las simulaciones 1 y 2 (Figura 20), con los despliegues 1 y 2, respectivamente, se ve como en la realidad las pérdidas a una mínima distancia se reducen y las correspondientes al segundo despliegue son prácticamente iguales.

### 3.4. PROPUESTA PARA DESPLIEGUE REAL

Como tarea final y en vista de los resultados obtenidos, se ha incluido una simulación mostrando lo que se podría empezar a hacer, si se quisiese seguir por este camino, ampliando los despliegues realizados hasta ahora.

Una posibilidad para realizar dicho despliegue es el mostrado en la Figura 58. Se pretende dar cobertura LoRa a distintos terrenos que forman una explotación agrícola ubicada a las afueras del municipio de Villarquemado (Teruel), a unos 2 kilómetros del núcleo urbano. Teniendo en cuenta que se trata de un terreno sin demasiados obstáculos, y tras las pruebas realizadas, donde el mayor alcance que se ha conseguido ha sido de 1 kilómetro (pero contando con multitud de obstáculos), se propone que la distancia nodo-gateway sea de 3 kilómetros aproximadamente.

Los 5 gateways se han ubicado de manera estratégica, en lugares donde pueda suministrarse electricidad, y a la vez puedan cumplir con la distancia establecida respecto a los nodos con los que deben comunicarse. Se puede visualizar en el mapa satélite de la Figura 58 como se han repartido. Por último, se ha simulado dicho despliegue, introduciendo en Omnet++ los siguientes parámetros:

<b>Gateways</b>	5
<b>Nodos</b>	50
<b>SF</b>	12
<b>TP</b>	20
<b>CR</b>	4
<b>BW</b>	125

**Tabla 16. Características Simulación Villarquemado (Teruel)**

Se puede observar en la Figura 59 la estructura de la red de la simulación realizada (parte izquierda) y, como se realiza la comunicación entre los nodos y gateways a la hora del envío y recepción de paquetes (parte derecha). Los resultados que se han obtenido han sido bastante favorables ya que la energía consumida, se asemeja a la de la Simulación 4 (97,75 mWh), teniendo en cuenta que se ha aumentado a 50 nodos y 5 gateways. En cuanto al porcentaje de pérdidas, también es similar, un 17,123% frente al 16,667% de la Simulación 4.



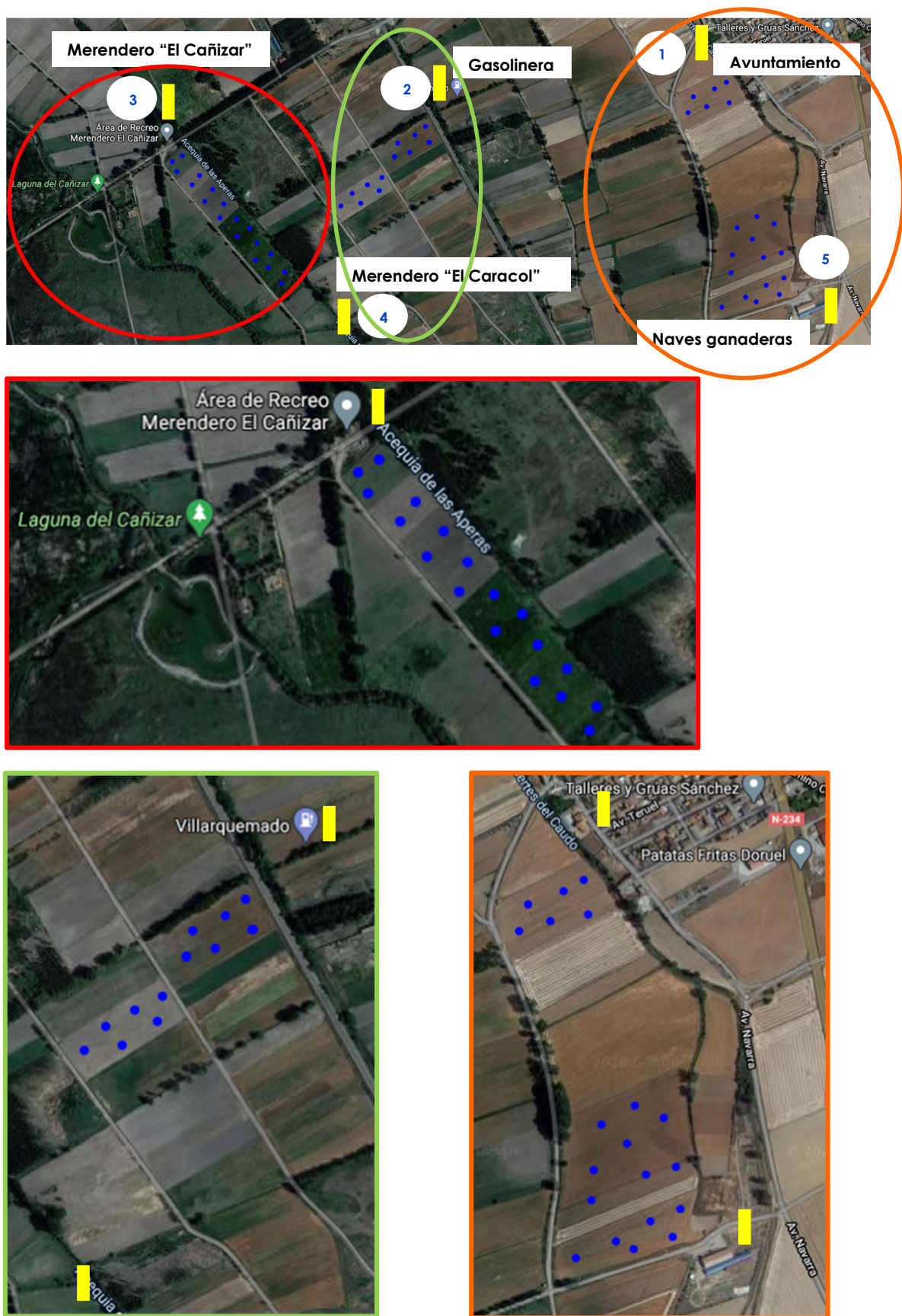
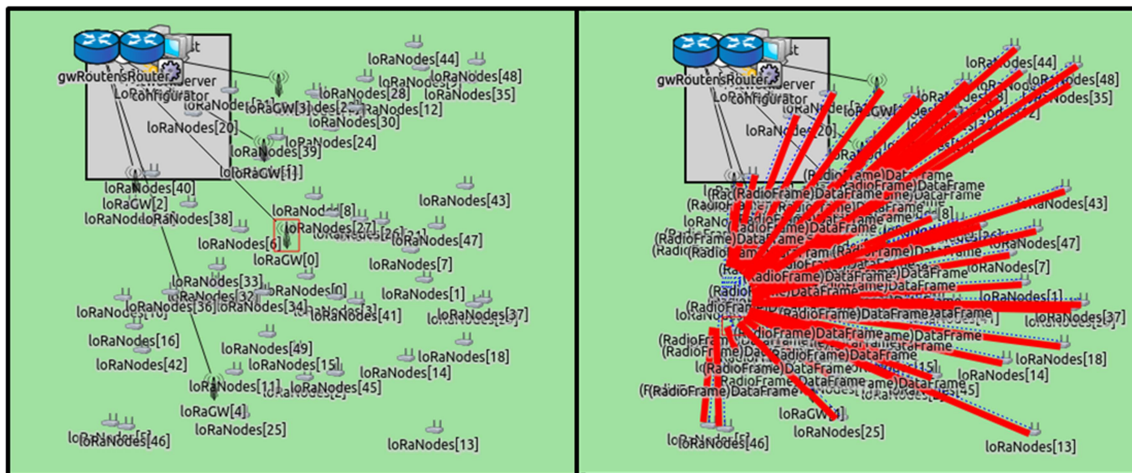


Figura 58. Mapa satélite de la red LoRa simulada en Villarquemado (Teruel)



**Figura 59. Infraestructura y comunicación en la Simulación de Villarquemado (Teruel) en el entorno Omnet++**

## CONCLUSIONES

Una vez presentado todo el trabajo llevado a cabo, resulta conveniente una breve valoración de todo ello. Como se ha podido comprobar las tecnologías LPWAN están siendo solicitadas en multitud de campos y no cabe duda que formarán parte del futuro de las aplicaciones IoT. Dadas las características de LoRaWAN, además del bajo coste de sus elementos físicos, se prevé que esta tecnología sea muy utilizada permitiendo crear redes de bajo coste.

En base a los resultados obtenidos, se deja ver que esta tecnología está especialmente diseñada para ser usada sobre todo en exteriores, donde es más efectiva, pues encuentra muchos menos obstáculos que dificulten la comunicación, algo bastante frecuente en el ámbito agrícola y ganadero, pues sus explotaciones se encuentran normalmente en terrenos sin edificar.

Se ha visto a través de los despliegues que cuanto más alejado se encuentre el nodo menor será el RSSI y SNR de cada mensaje (señal con menor potencia y más corrompida). Hasta 1 kilómetro (teniendo en cuenta que el despliegue se hizo en un terreno edificado), la garantía de comunicación era del 100%, sin embargo a partir de los 2 kilómetros, disminuyó al 70-75%. Si tenemos en cuenta las simulaciones, desarrolladas en condiciones favorables, se llegó a establecer comunicación hasta una distancia de 3 kilómetros, de lo que se puede deducir, que en un entorno agrícola/ganadero podría llevarse a cabo.

Por ello, combinando todo esto con el auge del Internet de las cosas (IoT), se cree que puede ser un sector en el que se pueden realizar grandes cosas, mejorar y sobre todo aprender. Por eso, finalmente se ha realizado una propuesta, de forma que bajo la tecnología LoRa, se puedan desplegar nuevas aplicaciones y servicios en algunas zonas de la provincia de Teruel.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [AdaLoraySigfox17] All the Internet of Things - Episode One: Transports, 2017. Adafruit Learning System [online], disponible en: <https://learn.adafruit.com/allthethings-episode-one-transport/lora-sigfox>
- [alfaiot20] AlfaiOT, Miguel Ángel Casanova González. ¿Qué es LoRa? | AlfaiOT. *Automatización del Internet de las Cosas*, SL [online]. 2020. Disponible en: <https://alfaiot.com/blog/ultimas-noticias-2/post/que-es-lora-2>
- [AlonsoLPWAN17] Dispositivos conectados: LPWAN y su importancia para la Internet de las Cosas - ITSitio, 2020. ITSitio [online], disponible en: <https://www.itsitio.com/ar/dispositivos-conectados-lpwan-importancia-la-internet-las-cosas/>
- [ArduinolDE] Arduino, 2020. Arduino.cc [online], disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>
- [ArsovskiQoL19] Quality of life and Society 5.0, 2019. Cqm.rs [online], disponible en: [http://www.cqm.rs/2019/papers\\_iqc/81.pdf](http://www.cqm.rs/2019/papers_iqc/81.pdf)
- [CamarilloCOVID20] Semtech's LoRa® Devices Integrated into Polysense's Infrared Temperature Sensor, 2020. Semtech.com [online], disponible en: <https://www.semtech.com/company/press/semtechs-lora-devices-integrated-into-polysenses-infrared-temperature-sensor>
- [CamarilloRhinos20] Semtech LoRa Technology Tracks Location of Endangered Black Rhinos in Africa, 2017. Semtech.com [online], disponible en: <https://www.semtech.com/company/press/semtech-lora-technology-tracks-location-of-endangered-black-rhinos-in-africa>
- [CaseStudiesNewDelhi19] Case Studies of Real Projects Solving Real Problems with LoRaWAN | LoRa Alliance®, 2019. Lora-alliance.org [online], disponible en: <https://lora-alliance.org/resource-hub/case-studies-real-projects-solving-real-problems-lorawan>
- [Casanova17] Seguridad en redes LoRaWAN (Parte I), 2017. Digimodes [online], disponible en: <https://digimodes.wordpress.com/2017/02/18/seguridad-en-redes-lorawan-parte-i/>
- [ClimaWikipedia20] Provincia de Teruel, 2020. Es.wikipedia.org [online], disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Provincia\\_de\\_Teruel#Clima](https://es.wikipedia.org/wiki/Provincia_de_Teruel#Clima)
- [DemografiaWikipedi] Provincia de Teruel, 2020. Es.wikipedia.org [online],

a20]	disponible en: <a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Provincia_de_Teruel#Demograf%C3%ADa">https://es.wikipedia.org/wiki/Provincia_de_Teruel#Demograf%C3%ADa</a>
[EstudioTIC Aragón17]	Estudio sobre utilización de las TIC en el sector agrícola de Aragón/ Observatorio Aragonés de Sociedad de la Información. – Zaragoza: Departamento de Innovación, Investigación y Universidad, Gobierno de Aragón, 2017. <a href="http://bibliotecavirtual.aragon.es/bva/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=3717859">Bibliotecavirtual.aragon.es</a> [online], disponible en: <a href="http://bibliotecavirtual.aragon.es/bva/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=3717859">http://bibliotecavirtual.aragon.es/bva/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=3717859</a>
[FAO20]	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2020. Food and Agriculture Organization of the United Nations [online], disponible en: <a href="http://www.fao.org/home/es/">http://www.fao.org/home/es/</a>
[FLoRaInstallation18]	Home   FLoRa - A Framework for LoRa simulations, 2018. <a href="https://flora.aalto.fi">Flora.aalto.fi</a> [online], disponible en: <a href="https://flora.aalto.fi/#install">https://flora.aalto.fi/#install</a>
[FLoRa18]	Home   FLoRa - A Framework for LoRa simulations, 2018. <a href="https://flora.aalto.fi">Flora.aalto.fi</a> [online], disponible en: <a href="https://flora.aalto.fi/">https://flora.aalto.fi/</a>
[FuturoSector Agrícola PwC19]	El futuro del sector agrícola español. PwC y AEPLA, 2019. <a href="https://www.pwc.es/es/publicaciones/assets/informe-sector-agricola-espanol.pdf">Pwc.es</a> [online], disponible en: <a href="https://www.pwc.es/es/publicaciones/assets/informe-sector-agricola-espanol.pdf">https://www.pwc.es/es/publicaciones/assets/informe-sector-agricola-espanol.pdf</a>
[HeltecESP32LoRa]	Heltec ESP32+LoRa Series Quick Start — Heltec Automation Docs V0.0.1 documentation, 2020. <a href="https://heltec-automation-docs.readthedocs.io">Heltec-automation-docs.readthedocs.io</a> [online], disponible en: <a href="https://heltec-automation-docs.readthedocs.io/en/latest/esp32/quick_start.html#via-arduino-board-manager">https://heltec-automation-docs.readthedocs.io/en/latest/esp32/quick_start.html#via-arduino-board-manager</a>
[HeltecLoRaWANESP32]	Heltec LoRa 32 LoRaWAN Node on The Things Network, 2020. Robot Zero One [online], disponible en: <a href="https://robotzero.one/heltec-lora32-lorawan-node/">https://robotzero.one/heltec-lora32-lorawan-node/</a>
[HeltecWiFiLoRa32]	Heltec WiFi LoRa 32 - ESP32 with OLED and SX1278, 2020. Robot Zero One [online], disponible en: <a href="https://robotzero.one/heltec-wifi-lora-32/">https://robotzero.one/heltec-wifi-lora-32/</a>
[HeltecLicense]	Heltec Resource, 2020. <a href="https://resource.heltec.cn">Resource.heltec.cn</a> [online], disponible en: <a href="https://resource.heltec.cn/search/">https://resource.heltec.cn/search/</a>



- [InetFramework20] INET Framework - INET Framework, 2020. Inet.omnetpp.org [online], disponible en: <https://inet.omnetpp.org/>
- [InstalationGuideOmnetAndrás16] OMNeT++ *Installation Guide*, 2016. , András Varga and OpenSim Ltd.
- [LoRaAlliance] Home page | LoRa Alliance®, 2020. *Lora-alliance.org* [online], disponible en: <https://lora-alliance.org/>
- [LoRaAllianceRegionalParameters19] LoRaWAN® Regional Parameters RP002-1.0.0 | LoRa Alliance®, 2019. *Lora-alliance.org* [online], disponible en: <https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawan-regional-parameters-rp002-100>
- [LoRaWANLoRa20] LoRaWAN y LoRa, 2020. *Lorawan.es* [online], disponible en: <https://lorawan.es/>
- [LoRa-LoRaWANMobilefish18] LoRa/LoRaWAN tutorials, Mobilefish, 2018 [online], [video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLmL13yqb6Oxd-eOi97Evl8QeO8o-PqeQ0g>
- [LPWANEgli15] Peter R. Egli. 2015. LPWAN Low Powerwide Area Network. Overview of emerging technologies for Low Power Wide Area Networks in Internet of Things. *Indigoo.com* [online], disponible en: [http://indigoo.com/dox/itdp/12\\_MobileWireless/LPWAN.pdf](http://indigoo.com/dox/itdp/12_MobileWireless/LPWAN.pdf)
- [LPWANIoT18] Rosa, Alexander, 2018, Qué es LPWAN: introducción al protocolo de comunicaciones de IoT. *Pandora FMS - The Monitoring Blog* [online]. 2018. Disponible en: <https://pandorafms.com/blog/es/que-es-lpwan/>
- [LPWANRouse20] What is LPWAN (low-power wide area network)? - Definition from WhatIs.com, 2020. *IoT Agenda* [online], disponible en: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/LPWAN-low-power-wide-area-network>
- [GoogleMaps20] Google Maps, 2020. Google Maps [online], disponible en: <https://www.google.es/maps/>
- [MartinezCano19] Jose Manuel Martinez-Caro, María Dolores Cano. *Improving the FLoRa Simulation Framework for the Performance Evaluation of IoT Scenarios*, 2019. Department of Information Technologies and

Communication Universidad Politécnica de Cartagena.

- [ModeloOSIWikipedia20] Modelo OSI, 2020. Es.wikipedia.org [online], disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo\\_OSI](https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_OSI)
- [Omnetpp18] OMNeT++ Discrete Event Simulator, 2018. Omnetpp.org [online], disponible en: <https://omnetpp.org/>
- [OntiverosRiqueza4.0 yEconomía17] Emilio Ontiveros, Diego Vizcaíno, Verónica López, Alejandro Llorente. Economía de los datos – Riqueza 4.0, 2018. Fundacioncarolina.es [online], disponible en: <https://www.fundacioncarolina.es/wp-content/uploads/2018/11/Libro-Economia-de-los-Datos-Ontiveros.pdf>
- [OracleIoT20] ¿Qué es Internet of Things (IoT)?, 2020. Oracle.com [online], disponible en: <https://www.oracle.com/es/internet-of-things/what-is-iot.html>
- [Polysense20] Polysense Technologies, 2020. Polysense.net [online], disponible en: <http://www.polysense.net/>
- [RedesLPWANArduino18] Redes LPWAN – Aprendiendo Arduino, 2018. Aprendiendoarduino.com [online], disponible en: <https://www.aprendiendoarduino.com/2018/03/05/redes-lpwan/>
- [Redexia19] Red LoRa – Características y Ventajas, 2019. Redexia [online], disponible en: <https://www.redexia.com/red-lora/>
- [RelieveWikipedia20] Provincia de Teruel, 2020. Es.wikipedia.org [online], disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Provincia\\_de\\_Teruel#Relieve](https://es.wikipedia.org/wiki/Provincia_de_Teruel#Relieve)
- [RuedaPortocarrero16] *De las redes de sensores inalámbricas al Internet de las cosas: ¿Tecnologías complementarias o antagonistas?* En Congreso Internacional en Innovación y Apropiación de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones-CIINATIC. 2016, Rueda-Rueda, J. S.; Portocarrero, J. M.
- [SabasIoTconLoRa117] Haciendo IoT con LoRa: Capítulo 1.- ¿Qué es LoRa y LoRaWAN?, 2017. Medium [online], disponible en: <https://medium.com/beelan/haciendo-iot-con-lora-cap%C3%ADtulo-1-qu%C3%A9-es-lora-y-lorawan-8c08d44208e8>
- [SabasIoTconLoRa217] Haciendo IoT con LoRa: Capítulo 2.- Tipos y Clases de Nodos, 2017. Medium [online], disponible en: <https://medium.com/beelan/haciendo-iot-con-lora-capitulo-2-tipos-y-clases-de-nodos-3856aba0e5be>

[Semtech20]	Semtech LoRa Technology Overview   Semtech, 2020. Semtech.com [online], disponible en: <a href="https://www.semtech.com/lora">https://www.semtech.com/lora</a>
[SemtechCorporation]	Analog and Mixed-Signal Semiconductors   Semtech, 2020. Semtech.com [online], disponible en: <a href="https://www.semtech.com/">https://www.semtech.com/</a>
[Sigfox]	Sigfox - The Global Communications Service Provider for the Internet of Things (IoT), 2020. Sigfox.com [online], disponible en: <a href="https://www.sigfox.com/en">https://www.sigfox.com/en</a>
[SmartAgricultureRICA19]	El futuro de la agricultura desde la perspectiva del Internet de las Cosas / Alicia Asín, 2019. Rica.chil.me [online], disponible en: <a href="http://rica.chil.me/post/el-futuro-de-la-agricultura-desde-la-perspectiva-del-internet-de-las-cosas-ali-275346">http://rica.chil.me/post/el-futuro-de-la-agricultura-desde-la-perspectiva-del-internet-de-las-cosas-ali-275346</a>
[SmartAgricultureWhitePaperLAlliance20]	Smart Agriculture White paper. How to make the right connection for precision agriculture, 2020. Lora-alliance.org [online], disponible en: <a href="https://loralliance.org/sites/default/files/2020-02/smart_agriculture_white_paper_final.pdf">https://loralliance.org/sites/default/files/2020-02/smart_agriculture_white_paper_final.pdf</a>
[TTN]	The Things Network, 2020. Thethingsnetwork.org [online], disponible en: <a href="https://www.thethingsnetwork.org/">https://www.thethingsnetwork.org/</a>
[TTNFrequencyPlans20]	Frequency Plans, 2020. The Things Network [online], disponible en: <a href="https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequency-plans.html">https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequency-plans.html</a>
[TTNLoRaWAN]	The Things Network. 2020. Lorawan [online] Disponible en: <a href="https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/">https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/</a>
[Vigano17]	Avnet Silica NB-IOT Sensor Shield, 2017. , Milán: A. Viganò.
[WikipediaWSN20]	Wireless sensor network, 2020. En.wikipedia.org [online], disponible en: <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_sensor_network">https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_sensor_network</a>

## ANEXOS

### ANEXO 1. MARCO TEÓRICO

En los últimos años IoT se ha convertido en uno de los aspectos claves de la evolución tecnológica, centrándose en interconectar el mayor número de dispositivos posible a través de Internet. Para lograrlo necesita emplear TICs que además de comunicaciones seguras, proporcionen movilidad y escalabilidad.

Por tanto las LPWANs, redes de baja potencia y largo alcance, mencionadas anteriormente, son una de las mejores soluciones para ofrecer a las aplicaciones IoT las características nombradas, pues son capaces de enviar pequeñas cantidades de datos, gracias a los sensores inalámbricos, a grandes distancias con poco consumo.

#### Redes de baja potencia y largo alcance - LPWAN

Como ya se ha introducido, las LPWAN son un tipo de red de comunicación inalámbrica cuyas características técnicas principales son el transporte de pequeñas cantidades de datos, el bajo consumo eléctrico que permite a los dispositivos permanecer largos periodos de tiempo conectados y el gran alcance geográfico.

Estas características son las que diferencian a LPWAN de otras tecnologías inalámbricas como Wi-Fi, Bluetooth, o Zigbee [LPWANEgli15].

En la siguiente figura se muestra el alcance de cada una de las tecnologías inalámbricas en términos de ancho de banda y alcance físico.

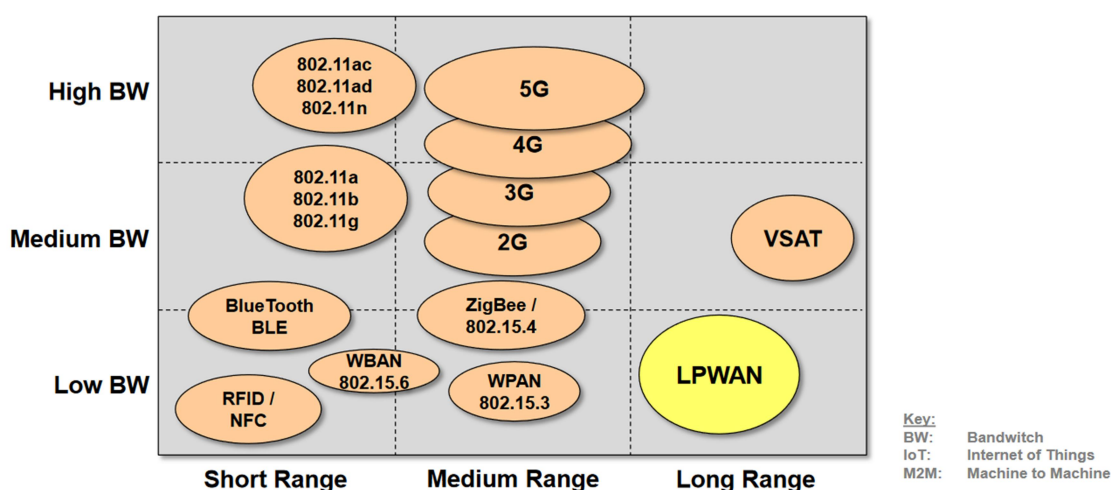


Figura 60. Tecnologías inalámbricas (BW/Range) [LPWANEgli15]

Tal como se aprecia en la Figura 60, una única tecnología inalámbrica no pueda cubrir todos los requerimientos de IoT, sin embargo LPWAN sí.

La banda de radiofrecuencia en la cual LPWAN suele trabajar en Europa es la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical), la cual representa un espectro

reservado internacionalmente al uso no comercial asociado con la industria, la ciencia y los servicios médicos [LPWANIoT18].

Esta banda es importante porque este grupo de frecuencias pueden ser utilizadas sin el pago por concepto de licencia, respetando las restricciones en los niveles de potencia transmitidas. Representando así una diferencia notable con las tecnologías celulares, en las que es necesario pagar por el derecho a transmitir en una frecuencia específica.

En cuanto a la frecuencia utilizada, existen diferencias dependiendo de la región; en Europa se utiliza la franja entre 867 y 869 MHz, en Estados Unidos entre 902 y 928 MHz y en Asia depende del país (Tabla 17). Este uso de diferentes frecuencias implica que los dispositivos de hardware pueden utilizarse en diferentes países pero requieren un ajuste en software para poder trabajar en una frecuencia particular.

	EUROPA	AMÉRICA DEL NORTE	CHINA	COREA	JAPÓN	INDIA
<b>Banda de frecuencia</b>	867-869 MHz	902-928 MHz	470-510 MHz	920-925 MHz	920-925 MHz	865-867 MHz
<b>Canales</b>	10	64+8+8	En definición por los Comités Técnicos de cada país.			
<b>Canal BW Up</b>	125/250 kHz	125/500 kHz				
<b>Canal BW Dn</b>	125 kHz	500 kHz				
<b>Potencia de TX Up</b>	+14 dBm	+20 dBm				
<b>Potencia de Tx Dn</b>	+14 dBm	+27 dBm				
<b>SF Up</b>	7-12	7-10				
<b>Velocidad de datos</b>	250-50 kbps	980-21.9 kbps				

Tabla 17. Banda de frecuencias ISM [alfaIoT20]

Existen diversas implementaciones del protocolo LPWAN, entre las más utilizadas se encuentran Sigfox [Sigfox] y LoRaWAN. Hay diferencias entre cada una de ellas en cuanto a los esquemas de modulación, el alcance geográfico, la cantidad de data transmitida y a sus capacidades de encriptación y autenticación. Por ello se ha creído conveniente elaborar una pequeña comparación entre ambas, para posteriormente centrarse en aquella de la que se va a hacer uso, LoRaWAN [RedesLPWANArduino18].

Tanto Sigfox como LoRa son tecnologías inalámbricas para IoT, ambas se posicionan de manera similar en el mercado. Las dos utilizan señales de gran alcance que pasan libremente a través de objetos sólidos y que requieren poca energía. Además ambas pueden cubrir fácilmente áreas grandes y también alcanzar objetos subterráneos. En Europa, ambas utilizan la misma

banda de frecuencias y logran alcances similares; pero difieren en otros aspectos [alfaiot20] [Vigano17]:

	<b>Sigfox</b>	<b>LoRaWAN</b>
<b>Cobertura</b>	> 15 Km	> 14 Km
<b>Banda de frecuencia</b>	868/902 MHz	433/868/780/915 MHz
<b>En Europa</b>	868 MHz	
<b>Ancho de banda</b>	100 Hz	< 500 Hz
<b>Velocidad de transmisión</b>	Hasta 1 Kbps	Hasta 50 Kbps
<b>Tamaño de paquete</b>	12 Bytes	Definido por el usuario (no más de 5s en el aire)
<b>Vida de batería</b>	> 10 años	
<b>Latencia</b>	Media	Rápida - Media
<b>Integración de datos</b>	API muy simple	API más complicada pero mucho más configurable
<b>Comunicación</b>	Unidireccional	Bidireccional
<b>Ventajas</b>	Poca potencia	
	Muy largo alcance	Largo alcance
		Encriptación y autenticación
		Uso gratuito
<b>Inconvenientes</b>	No encriptado	Chips bajo patentes
	Pago subscripción	
	Hasta 140 mensajes/día	

**Tabla 18. Sigfox vs. LoRaWAN**

Como puede deducirse, LoRaWAN es apto para un sector más amplio de aplicaciones, ya que permite una tasa de datos muy superior a Sigfox. Además, a pesar que ambas soluciones son de bajo coste económico y energético, LoRaWAN es compatible con geolocalización y es más sencilla de desplegar [AdaLoraySigfox17].

De esta forma, la tecnología empleada en este TFG será LoRaWAN.

### **Tecnología LoRaWAN**

En numerosas fuentes se pueden encontrar los términos LoRa y LoRaWAN utilizados de la misma forma, sin embargo no son lo mismo por lo que conviene dejarlo claro.

LoRa es un esquema de modulación de señales en radiofrecuencia creado por la empresa Semtech Corporation [SemtechCorporation]. Esta empresa diseña y produce, entre otros elementos, los chips LoRa que son utilizados como base física de las redes LoRaWAN.

LoRaWAN es un protocolo de red que usa la tecnología LoRa para comunicar y administrar dispositivos LoRa. Fue creado por la empresa Semtech la cual tiene su patente, pero ahora es la fundación LoRa Alliance [LoRa Alliance] la que trata de desarrollar esta tecnología.

Para comprenderlo mejor, si se atiende al modelo OSI, el cual está dividido en 7 capas; la tecnología LoRa haría referencia al nivel 1 y LoRaWAN abarcaría los niveles 2 y/o 3, lo que quiere decir que LoRaWAN gestiona los canales y parámetros de conexión de los dispositivos LoRa (Figura 62). Básicamente, LoRaWAN define el protocolo y la arquitectura de red sobre los que interactuarán directamente las aplicaciones [LoRaWANLoRa20].

1. Capa física
2. Capa de enlace de datos
3. Capa de red
4. Capa de transporte
5. Capa de sesión
6. Capa de presentación
7. Capa de aplicación

Figura 61. Capas modelo OSI [ModeloOSIWikipedia20]

LoRaWAN se define como un protocolo MAC (Media Access Control) para redes de área amplia, mientras que LoRa atendiendo a su acrónimo "Long Range", permite el envío y recepción de datos entre distintos dispositivos pequeños separados por una distancia considerable. Esto lo consigue haciendo uso de la técnica del espectro ensanchado, que consiste en enviar una señal por una banda de frecuencias mucho mayor de la necesaria teóricamente.

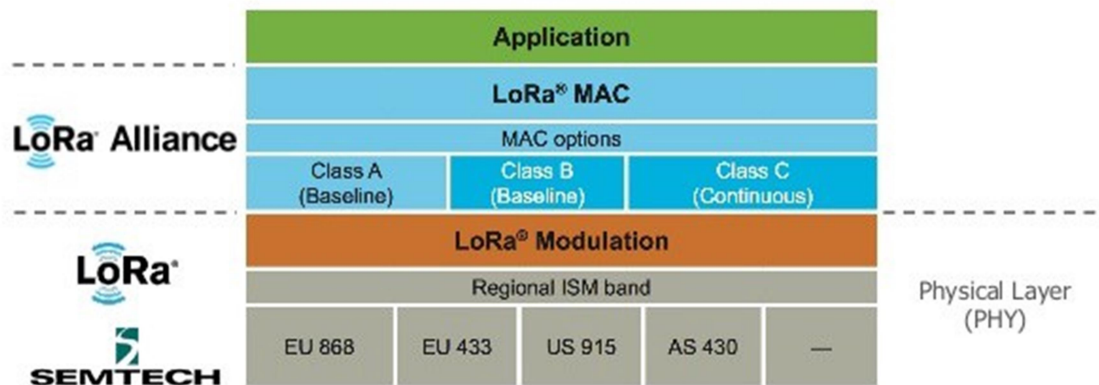


Figura 62. Arquitectura LoRaWAN [RedesLPWANArduino18]

Una vez se han diferenciado los dos términos se entrará en detalles más específicos.

LoRaWAN es el protocolo encargado de definir la arquitectura de red que se debe de seguir para poder proveer un servicio de IoT, los tipos de dispositivo que se pueden utilizar como módulos, los tipos de acceso que se pueden utilizar, la seguridad que se implementa y las funciones que debe de realizar cada elemento de la red (Figura 63).

Su ficha técnica muestra como características más relevantes [LoRaWANLoRa20]:



- Transmisión de Datos: de 250bps a 50Kbps
- Alcance geográfico: de 10 a 15Km
- Duración de baterías: de 10 a 20 años
- Encriptación: AES 128

Así se encarga de unir diferentes dispositivos LoRa gestionando sus canales y parámetros de conexión, mostrados a continuación:

<b>SF</b>	<b>Spreading Factor</b>	Varía entre 7 y 12 (ambos incluidos). Define el área de cobertura, a mayor SF, mayor rango y mayor inmunidad a interferencias. Sin embargo tendremos una velocidad de datos (DR) más baja.
<b>TP</b>	<b>Transmission Power</b>	Situada entre -4dBm y 20dBm. Establece la intensidad que usan los nodos LoRa para transmitir las tramas de datos al gateway. A mayor TP y SF, mayor área de cobertura.
<b>CR</b>	<b>Coding Rate</b>	Proporciona seguridad contra interferencias añadiendo símbolos de control para saber si los datos son correctos o no, e incluso poder determinar los valores correctos. Cuanto más altos sean los valores, mayor protección.
<b>BW</b>	<b>Band width</b>	Ancho de banda de la transmisión. A mayor BW, mayor velocidad de transferencia (DR), pero menor sensibilidad.
<b>CF</b>	<b>Carrier Frequency</b>	Frecuencia media dentro del rango según la región.

**Tabla 19. Parámetros de conexión dispositivos LoRa [MartínezCano19]**

Además de los parámetros de conexión, al trabajar con la tecnología LoRaWAN se deben tener en cuenta una serie de reglas y regulaciones, que dependen del país o región en el que se lleve a cabo el despliegue. Debido a que el despliegue se va a realizar en España, hay que tener en cuenta una serie de aspectos [LoRa-LoRaWANMobilefish18].

Ya se ha mencionado anteriormente la banda ISM en la que se trabaja en Europa, sin embargo existe un plan de frecuencia por país [TTNFrequencyPlans20] de forma que se debe tener en cuenta este plan con las características que afectan a España.

<b>País</b>	<b>Plan/Planes de frecuencia</b>	<b>Plan de frecuencia desarrollado</b>
ESPAÑA	EU863-870 EU433	EU863-870

**Tabla 20. Planes de frecuencia por país (España)**



Una vez se conoce tanto la banda de frecuencia en la que se debe operar como el plan de frecuencia del país en cuestión, en este caso España (Tabla 20), los parámetros a tener en cuenta son los siguientes [LoRaAllianceRegionalParameters19]:

EU863-870MHz ISM Band				
Modulación	BW (kHz)	Canal de frecuencia (MHz)	FSK Bitrate o LoRa DR/Bitrate	Duty-cycle
LoRa - CSS	125	868.10 868.30 868.50	DR0 – DR5 / 0.3-5 kbps	< 1%

Tabla 21. Características EU863-870MHz ISM Band

FSK es un parámetro que hace referencia al cambio de frecuencia y en cuanto a los canales de frecuencia, cada operador de red puede atribuirlos libremente, pero los 3 canales por defecto que todo nodo debe implementar son los que aparecen en la Tabla 21. El duty-cycle hace referencia al ciclo de trabajo, el cual está limitado y siempre debe ser menor del 1%.

El último aspecto a tener en cuenta es la modulación, LoRa utiliza la técnica CSS (Chirp Spread Spectrum). Consiste en utilizar una señal de banda estrecha a través de un ancho de banda mayor, de esta forma las tramas a enviar son robustas y ganan resistencia ante el ruido y las interferencias, pudiendo así alcanzar grandes distancias de recepción.

Llegado este momento conviene explicar cómo es la estructura de una red LoRa y cómo se lleva a cabo la comunicación entre los distintos componentes que la constituyen.

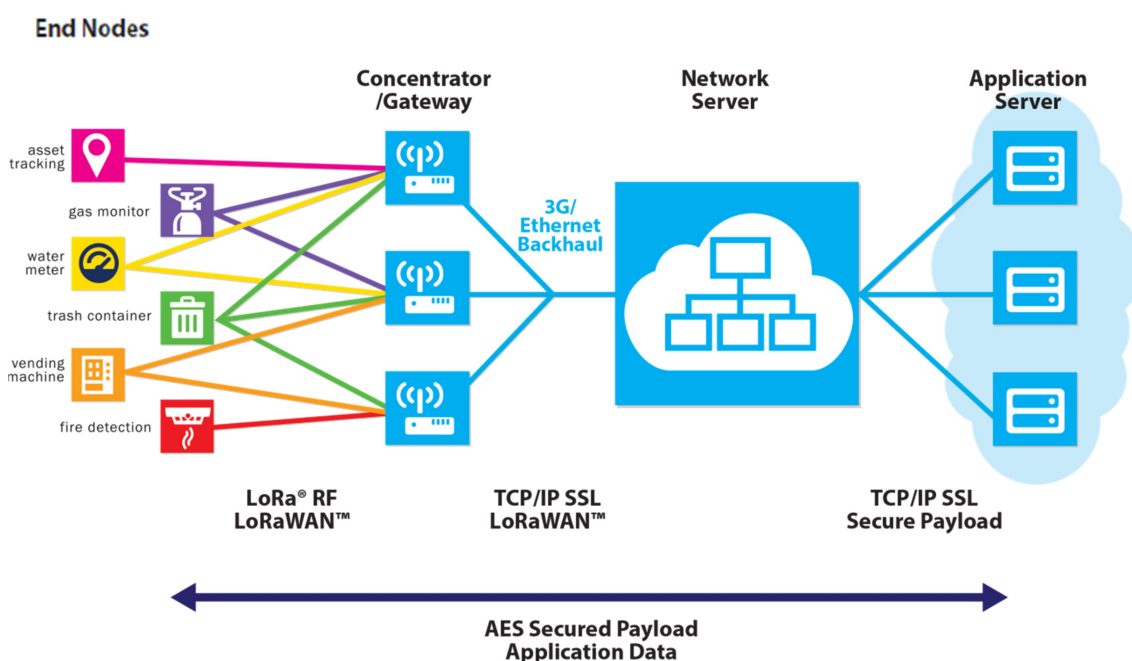


Figura 63. Esquema red LoRa

Como se puede ver en la Figura 63 la red se estructura siguiendo una topología en estrella. La razón principal es debido a que los dispositivos finales o módulos tienen una comunicación punto a punto con los gateways. Estos se comunican con el servidor que almacena los datos obtenidos por los módulos, y a su vez distintas aplicaciones pueden hacer uso de la información alojada en los servidores.

El funcionamiento de este tipo de arquitectura consiste en que la información que se envía desde un módulo puede ser captada por más de un gateway. Éstos envían dicha información recibida al servidor a través de distintos medios (redes móviles, Ethernet...). El servidor por su parte, se encarga de comprobar que la información no esté repetida, para almacenar sólo una vez cada dato.

Cuando el dato se encuentra correctamente almacenado en el servidor, se envía un ACK al gateway correspondiente confirmando la correcta recepción del dato en cuestión. De esta forma siempre que las aplicaciones del servidor necesiten cierta información, éste se la proporcionará [SabasloTconLoRa117].

Así pues los cuatro dispositivos que se observan en la **arquitectura** tienen su función:

### Dispositivos finales

Conocidos también como módulos, se encargan de enviar la información que detectan los sensores que tienen integrados, que pueden ser muy variados, desde sensores de humo a sensores de luminosidad, temperatura, humedad, etc. El envío de información se puede producir de distintas formas, tanto en el momento que se produce una variación en el entorno como de forma periódica, o incluso por petición del servidor.

### Gateways

También llamados pasarelas. La función de estos dispositivos consiste en hacer de antenas que reciben la información de los dispositivos finales (sensores) y la reenvían al servidor realizando la conversión de LoRa al protocolo de transporte UDP de la arquitectura TCP/IP en sentido ascendente y la conversión inversa en sentido descendente.

### Servidor

Elemento cuya función principal es recibir la información procedente de los gateways, filtrarla y posteriormente almacenarla en una base de datos con la cual se proporcionará la información requerida por la aplicación final.

### Servidor de Aplicación

Se trata del elemento final de la red. Provee los servicios y la información al usuario final o a la máquina en cuestión.

En cuanto a la **clase de dispositivos** finales que pueden formar parte de la red, no todos ofrecen el mismo servicio, de la misma forma que no todos emplean los mismos parámetros. Por ello, con el objetivo de optimizar la variedad de

aplicaciones que se pueden ofrecer, LoRaWAN emplea tres clases de dispositivos.

Todos ellos admiten comunicación bidireccional, sin embargo sus diferencias residen en la durabilidad de la batería y la latencia de comunicación [TTNLoRaWAN].

- **Clase A:** Garantizan la comunicación bidireccional entre el nodo y el Gateway de forma que los mensajes ascendentes (del nodo al servidor) se pueden enviar en cualquier momento, pero los descendentes (del servidor al nodo) solamente en las ventanas que abre el nodo (1 y 2 segundos después de enviar su mensaje).
- **Clase B:** Engloban la funcionalidad de los dispositivos de clase A, además de permitir la recepción de mensajes descendentes en ventanas programadas.
- **Clase C:** A diferencia de las dos clases anteriores, estos dispositivos tienen la ventana de recepción de información siempre abierta. De esta manera, permiten recibir mensajes descendentes en cualquier momento, a excepción de cuando se esté transmitiendo. Sin embargo, su consumo de energía es mucho mayor.

Haciendo referencia al **acceso a la red**, los nodos pueden unirse a la red LoRaWAN usando dos técnicas diferentes que regulan dicho acceso [Casanova17]:

- **ABP** (Activation By Personalization): Es un mecanismo de acceso en el que existen tres identificadores:
  - La clave de sesión de red (Network Session Key)
  - La clave de sesión de aplicación (Application Session Key)
  - La dirección del nodo (DevAddr) que desea acceder a la red.

Estos tres identificadores son conocidos tanto por el servidor como por el módulo, ya que han sido previamente cargados. Esta situación permite que el acceso a la red por parte del módulo sea instantáneo, así como la transmisión de paquetes. Es una manera de acelerar la conexión, pero se aumentan los riesgos.

- **OTAA** (Over the Air Activation): En este caso, a diferencia del anterior, las claves de cifrado se negocian entre el módulo y el servidor para poder acceder a la red. Es el modo más seguro, puesto que el módulo informa al servidor sobre dos identificadores [SabasloTconLoRa217]:

- **DevEUI:** Identificador de fábrica del dispositivo
- **AppEUI:** Identificador único de la aplicación

También envía la clave de la aplicación a la que pretende dar servicio:

- **AppKey:** Clave de seguridad AES de 128 bits entre nodo y red

Posteriormente, tras recibir y procesar esta información, el servidor envía al módulo que desea acceder los siguientes parámetros:

- **Network Session Key** y **Application Session Key**: Claves de seguridad entre nodo y operador
- **DevAddress**: Dirección que se usará para la comunicación. Puede ser leído por cualquiera de los elementos que forman la red, su función reside en diferenciar unos equipos de otros.

De esta forma, el intercambio de información no se produce hasta que este proceso se haya realizado por completo.

Finalmente muy relacionado con esta última técnica, conviene comentar que la **seguridad** es un aspecto muy importante en las redes de sensores inalámbricas puesto que la información transmitida puede almacenar contenido sensible. LoRaWAN garantiza seguridad punto a punto porque emplea el algoritmo de cifrado AES-128 para integrar dos capas de seguridad, proporcionando así protección tanto a nivel de red como de aplicación.

## ANEXO 2. RESULTADOS DESTACADOS DE LAS SIMULACIONES

Sim	Config	Tiempo (horas)	Energía Consumida (mWh)	%PER	%Utilización del canal			
					GW	R1(gwRt)	R2(nsRt)	Server
1	1	1	5,762	25	3,451	6,903	2,589	5,177
	2		5,762	12,5	3,451	6,903	2,588	6,04
	3		26,78	12,5	3,451	6,903	3,451	6,04
	4		7,682	25	3,942	10,511	2,628	7,833
	5		7,682	25	3,942	10,511	2,628	7,833
	6		15,256	25	3,942	10,511	2,628	7,883
	7		7,682	20,448	3,584	9,557	3,584	8,362
	8		7,682	12,5	3,584	9,557	3,584	8,362
	9		8,881	12,5	3,584	9,557	3,584	8,362
	10		5,762	12,5	3,449	6,899	2,587	6,036
	11		5,762	12,5	3,449	6,899	2,587	6,036
	12		31,607	12,5	3,449	6,899	2,587	6,036
	13		7,682	25	3,941	10,508	2,627	7,881
	14		7,682	25	3,941	10,508	2,627	7,881
	15		17,268	25	3,941	10,508	2,627	7,881
	16		7,682	12,5	3,584	9,556	3,584	8,362
	17		7,682	12,5	3,584	9,556	3,584	8,362
	18		9,258	12,5	3,584	9,556	3,584	8,362
	19		11,016	12,5	3,458	6,916	2,593	6,051
	20		5,762	12,5	3,458	6,916	2,593	6,051
	21		11,016	12,5	3,458	6,916	2,593	6,051
	22		7,682	25	3,945	10,520	2,630	7,890
	23		7,682	25	3,945	10,520	2,630	7,890
	24		9,576	25	3,945	10,520	2,630	7,890
	25		7,682	12,5	3,584	9,558	3,584	8,363
	26		7,682	12,5	3,584	9,558	3,584	8,363
	27		63,376	100	0	0	0	0
	28		5,762	25	3,457	6,915	2,593	5,186
	29		5,762	12,5	3,457	6,915	2,593	6,051
	30		12,223	12,5	3,457	6,915	2,593	6,051
	31		7,682	25	3,945	10,519	2,63	7,89
	32		7,682	25	3,945	10,519	2,63	7,89
	33		10,079	25	3,945	10,519	2,63	7,89
	34		7,682	12,5	3,584	9,558	3,584	8,363
	35		7,682	12,5	3,584	9,558	3,584	8,363
	36		63,98	100	0	0	0	0

Tabla 22. Datos Simulación 1

Sim	Config	Tiempo (horas)	Energía Consumida (mWh)	%PER	%Utilización del canal			
					GW	R1(gwRt)	R2(nsRt)	Server
2	1	1	5,762	12,5	3,451	6,903	2,588	6,04
	2		5,762	25	3,451	6,903	2,588	5,177
	3		229,604	100	0	0	0	0
	4		61,459	100	0	0	0	0
	5		51,856	100	0	0	0	0
	6		108,011	100	0	0	0	0
	7		63,38	100	0	0	0	0
	8		61,459	100	0	0	0	0
	9		69,127	100	0	0	0	0
	10		5,762	12,5	3,449	6,899	2,587	6,036
	11		5,762	25	3,449	6,899	2,587	5,174
	12		268,221	100	0	0	0	0
	13		61,459	100	0	0	0	0
	14		61,459	100	0	0	0	0
	15		122,804	100	0	0	0	0
	16		61,459	100	0	0	0	0
	17		61,459	100	0	0	0	0
	18		71,541	100	0	0	0	0
	19		61,459	100	0	0	0	0
	20		61,459	100	0	0	0	0
	21		103,495	100	0	0	0	0
	22		61,459	100	0	0	0	0
	23		61,459	100	0	0	0	0
	24		73,577	100	0	0	0	0
	25		61,459	100	0	0	0	0
	26		61,459	100	0	0	0	0
	27		63,376	100	0	0	0	0
	28		61,459	100	0	0	0	0
	29		61,459	100	0	0	0	0
	30		114,765	100	0	0	0	0
	31		61,459	100	0	0	0	0
	32		61,459	100	0	0	0	0
	33		77,275	100	0	0	0	0
	34		61,459	100	0	0	0	0
	35		61,459	100	0	0	0	0
	36		63,98	100	0	0	0	0

Tabla 23. Datos Simulación 2

Sim	Config	Tiempo (horas)	Energía Consumida (mWh)	%PER	%Utilización del canal			
					GW	R1(gwRt)	R2(nsRt)	Server
3	1	1	14,818	0	3,635	8,482	3,635	8,482
	2		14,818	0	3,622	8,451	3,622	8,451
	3		78,743	16,667	2,487	4,973	1,658	4,144
	4		15,365	14,286	3,918	13,714	3,918	11,754
	5		23,047	0	2,54	6,351	2,54	6,351
	6		80,528	100	0	0	0	0
	7		43,214	100	0	0	0	0
	8		43,651	100	0	0	0	0
	9		48,725	100	0	0	0	0
	10		15,778	0	3,635	8,482	3,635	8,482
	11		15,778	0	3,625	8,459	3,625	8,459
	12		92,978	16,667	2,485	4,971	1,657	4,142
	13		15,365	14,286	3,916	13,707	3,916	11,749
	14		23,047	0	2,54	6,351	2,54	6,351
	15		90,182	100	0	0	0	0
	16		43,214	100	0	0	0	0
	17		43,552	100	0	0	0	0
	18		50,798	100	0	0	0	0
	19		18,246	16,667	2,491	4,983	1,661	4,152
	20		18,246	16,667	2,491	4,983	1,661	4,152
	21		74,387	100	0	0	0	0
	22		44,174	100	0	0	0	0
	23		44,174	100	0	0	0	0
	24		53,262	100	0	0	0	0
	25		43,632	100	0	0	0	0
	26		43,214	100	0	0	0	0
	27		45,01	100	0	0	0	0
	28		18,246	16,667	2,491	4,982	1,661	4,152
	29		18,246	16,667	2,491	4,982	1,661	4,152
	30		81,326	100	0	0	0	0
	31		44,174	100	0	0	0	0
	32		44,174	100	0	0	0	0
	33		55,676	100	0	0	0	0
	34		43,626	100	0	0	0	0
	35		43,626	100	0	0	0	0
	36		45,437	100	0	0	0	0

Tabla 24. Datos Simulación 3



Sim	Config	Tiempo (horas)	Energía Consumida (mWh)	%PER	%Utilización del canal			
					GW	R1(gwRt)	R2(nsRt)	Server
4	1	1	16,732	16,667	3,422	6,844	2,281	5,704
	2		49,382	100	0	0	0	0
	3		185,999	100	0	0	0	0
	4		48,464	100	0	0	0	0
	5		48,464	100	0	0	0	0
	6		86,333	100	0	0	0	0
	7		48,015	100	0	0	0	0
	8		48,015	100	0	0	0	0
	9		54,006	100	0	0	0	0
	10		16,732	16,667	3,419	6,839	2,28	5,699
	11		49,382	100	0	0	0	0
	12		219,296	100	0	0	0	0
	13		48,464	100	0	0	0	0
	14		48,464	100	0	0	0	0
	15		96,389	100	0	0	0	0
	16		48,015	100	0	0	0	0
	17		48,015	100	0	0	0	0
	18		56,206	100	0	0	0	0
	19		49,936	100	0	0	0	0
	20		48,015	100	0	0	0	0
	21		82,169	100	0	0	0	0
	22		48,015	100	0	0	0	0
	23		48,015	100	0	0	0	0
	24		57,482	100	0	0	0	0
	25		48,015	100	0	0	0	0
	26		48,015	100	0	0	0	0
	27		49,573	100	0	0	0	0
	28		48,458	100	0	0	0	0
	29		48,458	100	0	0	0	0
	30		90,456	100	0	0	0	0
	31		48,015	100	0	0	0	0
	32		48,015	100	0	0	0	0
	33		59,996	100	0	0	0	0
	34		46,094	100	0	0	0	0
	35		48,015	100	0	0	0	0
	36		45,437	100	0	0	0	0

Tabla 25. Datos Simulación 4