



Estudio experimental de tecnologías LPWAN en entornos industriales 4.0

Autor: Ana Planes Martínez

Tutor: Víctor Miguel Sempere Payá

Cotutor: David Todoli Ferrandis

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2019-20

Valencia, 8 de septiembre de 2020



Agradecimientos

Agradecer en primer lugar a mi tutor Víctor Miguel Sempere, por ofrecerme este proyecto y llevar a cabo la supervisión y dirección del trabajo. A mi cotutor David Todoli, por su ayuda y compromiso durante el proceso y aconsejarme en aquellos momentos más necesarios.

También agradecer el apoyo y colaboración del Instituto Tecnológico de Informática (ITI) por el cese de material, las instalaciones y la gente que he conocido durante mi estancia.

A mi familia, y en especial a mis padres, por todo su apoyo incondicional desde el primer momento ya que sin ellos no habría llegado donde estoy.

Gracias a todos mis amigos, incluidos los que me llevo de la carrera, por estar ahí en todo momento.

Por último, agradecer a Jorge todo el apoyo recibido, por estar siempre en las buenas y en las malas durante estos años.



Resumen

Hablar de Industria 4.0 es hablar de futuro, ya que es un término en plena expansión, y es por ello que es uno de los temas principales de este trabajo. La cuarta revolución industrial precisa de redes eficientes, con un bajo coste en la transmisión y un consumo bajo de energía. Para un entorno industrial 4.0, donde se precise una captura masiva de datos, la tecnología que más se adapta es la LPWAN.

LPWAN es la tecnología que acerca el IoT al entorno industrial. Es de aquí donde surge el término Industrial IoT, el cual se ocupa de la gestión de datos a gran escala, necesarios para profundizar en el proceso de digitalización en la industria.

En este Trabajo Fin de Grado se ha realizado el estudio de la tecnología LoRaWAN para optimizar las redes LPWAN en entornos industriales 4.0. En primer lugar, se ha realizado un estudio teórico de las tecnologías LPWAN.

A continuación, se selecciona la tecnología más apropiada a las necesidades (LoRaWAN) para realizar las simulaciones apropiadas. Después se realizan ciertas mejoras para una simulación más realista. Por último, se realiza un análisis de los resultados obtenidos y el estudio de líneas futuras para llevar a cabo un despliegue que pueda corroborar las simulaciones realizadas.



Resum

Parlar d'Indústria 4.0 és parlar de futur, ja que és un terme en plena expansió, i és per això que és un dels temes principals d'aquest treball. La quarta revolució industrial precisa de xarxes eficients, amb un baix cost en la transmissió i un consum baix d'energia. Per a un entorn industrial 4.0, on es precise una captura massiva de dades, la tecnologia que més s'adapta és la LPWAN.

LPWAN és la tecnologia que acosta el IoT a l'entorn industrial. És d'ací on sorgeix el terme Industrial IoT, el qual s'ocupa de la gestió de dades a gran escala, necessaris per a aprofundir en el procés de digitalització en la indústria.

En aquest Treball Fi de Grau s'ha realitzat l'estudi de la tecnologia LoRaWAN per a optimitzar les xarxes LPWAN en entorns industrials 4.0. En primer lloc, s'ha realitzat un estudi teòric de les tecnologies LPWAN.

A continuació, se selecciona la tecnologia més apropiada a les necessitats (LoRaWAN) per a realitzar les simulacions apropiades. Després es realitzen certes millores per a una simulació més realista. Finalment, es realitza una anàlisi dels resultats obtinguts i l'estudi de línies futures per a dur a terme un desplegament que puga corroborar les simulacions realitzades.



Abstract

Talking about Industry 4.0 is talking about the future, since it is a term in full expansion, and that is why it is one of the main topics of this work. The fourth industrial revolution requires efficient networks, with low transmission costs and low energy consumption. For an industrial 4.0 environment, where massive data capture is required, the most suitable technology is LPWAN.

LPWAN is the technology that brings the IoT closer to the industrial environment. This is where the term Industrial IoT arises, which deals with the management of large-scale data, necessary to deepen the digitization process in the industry.

In this Final Degree Project, the study of LoRaWAN technology has been carried out to optimize LPWAN networks in industrial 4.0 environments. Firstly, a theoretical study of LPWAN technologies has been carried out.

Then, the most appropriate technology is selected for the needs (LoRaWAN) to perform the appropriate simulations. Then certain improvements are made for a more realistic simulation. Finally, an analysis of the results obtained and the study of future lines are carried out to carry out a deployment that can corroborate the simulations carried out.



Índice

Capítulo 1. Introducción	6
1.1 IoT	6
1.2 Industria 4.0.....	6
Capítulo 2. Objetivos	8
2.1 Metodología	8
2.1.1 Gestión del proyecto.....	8
2.1.2 Distribución de tareas.....	9
Capítulo 3. Estado del Arte LPWAN.....	11
3.1 LoRa.....	11
3.1.1 Especificaciones técnicas	11
3.1.2 Ventajas.....	12
3.1.3 Desventajas.....	12
3.2 LoRaWAN	13
3.2.1 Comunicación.....	13
3.2.2 Clases de los nodos	14
3.2.3 Duty Cycle.....	16
3.2.4 Adaptive Data Rate	16
3.2.5 Seguridad.....	19
3.3 Otras tecnologías	20
3.3.1 SIGFOX	20
3.3.2 DASH7	21
3.3.3 NB-IoT	22
3.4 Casos de uso	23
Capítulo 4. Trabajo previo sobre la tecnología LoRaWAN.....	25
4.1 Estudios previos	25
4.2 Primer contacto con la tecnología LoRaWAN.....	26
4.3 Configuración del dispositivo final	27
4.4 Configuración del gateway.....	28
4.5 Estudio del despliegue.....	29
Capítulo 5. Desarrollo del trabajo	33
5.1 Escenario	33
5.2 Implementación del mecanismo ADR	36
Capítulo 6. Simulaciones y resultados	39



6.1	Simulaciones sin el mecanismo ADR para clase B.....	39
6.2	Simulaciones con la implementación del mecanismo ADR para mensajes de subida	40
6.3	Simulaciones con la implementación del mecanismo ADR modificando el contador para mensajes de subida	46
6.4	Simulación con la implementación del mecanismo ADR modificando el cambio de SF para mensajes de subida	50
6.5	Con la implementación del mecanismo ADR para mensajes de bajada clase B	53
Capítulo 7.	Conclusiones	56
Capítulo 8.	Trabajos futuros.....	57
8.1	Mejora del mecanismo implementado	57
8.2	Despliegue físico.....	58
Capítulo 9.	Bibliografía.....	59



Índice de Figuras

Figura 1. IIoT [4].....	7
Figura 2. Duración de las tareas realizadas.	9
Figura 3. Diagrama temporal de las tareas realizadas.	9
Figura 4. Pila de funcionamiento.	13
Figura 5. Comunicación entre los dispositivos finales y el servidor de aplicaciones [8].....	14
Figura 6. Comunicaciones de los dispositivos de clase B.	15
Figura 7. Funcionamiento de las distintas clases de LoRaWAN.	15
Figura 8. Mensaje de subida activando el mecanismo de ADR.	16
Figura 9. Envío del mensaje por parte del servidor con el nuevo SF.	17
Figura 10. Tiempos de espera para el mensaje de bajada.	18
Figura 11. Incremento del SF cuando no se recibe respuesta del servidor.....	18
Figura 12. Seguridad en las comunicaciones LoRaWAN.	19
Figura 13. Estructura del mensaje.	20
Figura 14. Tecnologías LPWAN.....	20
Figura 15. Modelos de comunicación entre el gateway y los nodos.	21
Figura 16. Casos de uso de la tecnología LoRaWAN [17].	23
Figura 17. Mensajes recibidos en el servidor.	26
Figura 18. Mensaje recibido en el nodo.	27
Figura 19. Dispositivo final STM32L072CZY6TR.....	27
Figura 20. LoRaGo PORT – Multi-channel LoRaWAN Gateway.	28
Figura 21. Raspberry Pi 3 Model B.....	28
Figura 22. Interfaz servidor de aplicaciones.	29
Figura 23. Planta baja del Instituto universitarios de investigación y centros de investigación.	29
Figura 24. Niveles del edificio de Investigación.....	30
Figura 25. a) Despliegue en el nivel inferior, b) Despliegue en el nivel superior.....	30
Figura 26. Despliegue con un gateway dentro del campus de Vera.....	31
Figura 27. Despliegue con dos gateways dentro del campus de Vera.....	31
Figura 28. Despliegue en la zona costera.	32
Figura 29. Disposición de los dispositivos dentro de la planta industrial.	33
Figura 30. Diagrama del mecanismo de ADR.	37
Figura 31. Parte principal de la implementación del mecanismo de ADR.	38
Figura 32. Probabilidades de recepción sin el mecanismo ADR.	39
Figura 33. SNR promedio de los 200 nodos.	40
Figura 34. Cambios de SF para cada instante temporal.	41



Figura 35. Comparación entre el nodo más lejano y el más cercano.	42
Figura 36. Mapa de calor en el instante de tiempo $t = 1$ hora y 40 minutos.	42
Figura 37. Mapa de calor en el instante de tiempo $t = 1$ hora y 45 minutos.	43
Figura 38. Mapa de calor en el instante de tiempo $t = 1$ hora y 50 minutos.	43
Figura 39. Mapa de calor en el instante de tiempo $t = 1$ hora y 55 minutos.	44
Figura 40. Mapa de calor en el instante de tiempo $t = 2$ horas.	44
Figura 41. Consumo en la transmisión para 11,11 horas.	46
Figura 42. Cambios de SF sin modificaciones en el ADR.	47
Figura 43. Probabilidad de recepción en los paquetes de subida sin modificaciones en el ADR.	47
Figura 44. Probabilidad de recepción en los paquetes de subida con un contador de 10 paquetes.	48
Figura 45. Cambios de SF para un contador de 10 paquetes.	48
Figura 46. Probabilidad de recepción en los paquetes de subida recibidos con un contador de 5 paquetes.	49
Figura 47. Comparación de las probabilidades de éxito para distintos contadores.	50
Figura 48. Diagrama del mecanismo de ADR modificado.	51
Figura 49. Implementación ADR modificado.	52
Figura 50. Cambios de SF para saltos de dos SF.	52
Figura 51. Diagrama del mecanismo de ADR para mensajes clase B.	54
Figura 52. Mapa de calor del SF al que envía el gateway mensajes de clase B.	55
Figura 53. Movilidad del nodo en varios instantes temporales.	57
Figura 54. Disposición de los gateways para la movilidad de los nodos.	58



Índice de Tablas

Tabla 1. Requisitos reglamentarios de LoRa en Europa y América del Norte [6].	11
Tabla 2. Frecuencias de trabajo en distintas zonas geográficas.	12
Tabla 3. Límites del Duty Cycle para las distintas bandas de frecuencia. [10].	16
Tabla 4. Límite SNR de cada SF para el ancho de banda de 125 kHz.	17
Tabla 5. Medidas a realizar en el despliegue.	31
Tabla 6. Parámetros configurados en la simulación.	35
Tabla 7. Parámetros definidos para el modelo de canal.	35
Tabla 8. Equivalencia entre Data Rate y Spreading Factor.	39
Tabla 9. Valores de la simulación sin mecanismo de ADR.	45
Tabla 10. Valores de la simulación con el mecanismo de ADR.	45
Tabla 11. Parámetros modificados en la configuración del simulador y del mecanismo de ADR.	46
Tabla 12. Promedio del valor de Nstep en cada SF.	51
Tabla 13. Valores de la simulación con ADR con salto de 2SF.	53
Tabla 14. Cambios de SF en paquetes de clase B.	54
Tabla 15. Porcentaje de mensajes de clase B recibidos.	55

Capítulo 1. Introducción

1.1 IoT

El uso de Internet en la actualidad se expande a diario y de forma multifacética. El IoT (Internet of Things) es uno de los nuevos enfoques que permite incorporar el uso de Internet en ámbitos donde aún no se hacía uso, como en la vida personal de las personas, o el IIoT que es su aplicación en la industria.

Dicho término, también conocido como “Internet de los Objetos”, representa aquellos dispositivos que de alguna forma están conectados a Internet, sin importar el tamaño, capacidad o utilidad del objeto [1].

El creciente uso de la tecnología IoT se justifica gracias a la facilidad de poder conectar cualquier dispositivo a Internet. Emplean un gran abanico de protocolos de red, aplicaciones de control, etc.... Debido a este aumento, el uso de Internet se ve mucho más generalizado en la vida social e íntima de las personas.

El término tiene su origen a mediados de 1999, donde Kevin Ashton, directivo de Procter & Gamble, creó una agrupación de investigadores en el Massachusetts Institute of Technology (MIT). Su labor era averiguar la información sobre el reconocimiento por radiofrecuencia en red (RFID) y tecnología basada en sensores [2].

Basándose en sus orígenes, se puede concretar la definición del concepto de IoT en una colección de objetos ilimitados conectados permanentemente a un escenario digital.

1.2 Industria 4.0

Empezando por los orígenes, la Industria 1.0 fue el principio de la industrialización donde se empezó a usar la mecanización, el uso de la energía procedente del vapor, sus orígenes tuvieron lugar en 1784. La industria evolucionó y surgió la Industria 2.0 en 1870, dando paso a las líneas de montaje, la producción en masa y la energía eléctrica. Pero con la aparición de la automatización, los ordenadores y la electrónica en 1969 surgió la Industria 3.0. Con esta industria la gente está más familiarizada actualmente, pero esto va a cambiar [3].

En la actualidad los sistemas ciberfísicos, el uso de Internet y el de las redes está evolucionando la industria, dando paso a la Industria 4.0.

La Industria 4.0, también nombrada la Industria Inteligente, busca una transformación de la empresa a una organización inteligente que le permita lograr los mejores resultados.

El término consiste en el uso de tecnologías de automatización, la digitalización de los procesos y el uso de tecnologías electrónicas.

Basándose en su definición, surge el concepto IIoT “Industrial Internet of Things”. El uso de Internet de las cosas con el objetivo de mejorar los resultados en los procesos industriales.



Figura 1. IIoT [4].

Como se observa en la Figura 1, lo que se pretende es tener una infraestructura de sensores conectados a una red que permita el control de los datos por parte de un operario a través de una aplicación. De esta forma, los sensores pueden estar también conectados entre ellos en una cadena de montaje e ir intercambiando información entre ellos para que los procesos se vayan realizando de forma automática.

Resumiendo, la cuarta revolución industrial precisa de redes eficientes para la comunicación de los dispositivos. Es por ello que la tecnología LPWAN es una buena solución para la captura masiva de información en plantas industriales.

La tecnología LPWAN en el ámbito de la Industria 4.0 nos permite diseñar redes sencillas para la captura masiva de información, pero reduciendo considerablemente el consumo de energía y el coste de la transmisión. De esta forma, se aportan nuevas soluciones a la hora de transportar información no intrusiva con los sistemas de control. Además, aquellos dispositivos que se ubiquen en lugares de difícil acceso podrán alargar su vida útil y obtener mejores resultados en cuanto a la comunicación.

Capítulo 2. Objetivos

La tecnología LPWAN presenta un gran futuro en las comunicaciones de redes de área amplia y de baja potencia, particularmente su uso en entornos industriales. Este trabajo en especial se ha centrado en el estudio de dichas tecnologías a nivel industrial, las cuales se utilizan para la comunicación y administración masiva de dispositivos.

El primer objetivo es seleccionar la tecnología LPWAN que más se adapta a un entorno industrial 4.0, en este caso, la tecnología LoRaWAN ofrece un gran número de ventajas en la comunicación de dispositivos y ahorro de batería.

Una vez seleccionada la tecnología LPWAN que más se adapta a las necesidades, el segundo objetivo es realizar un pequeño análisis donde poder observar el comportamiento de dicha tecnología y de esta forma analizarla. Para ello se han realizado pruebas en un entorno simulado.

En tercer lugar, se realiza una mejora de la herramienta de simulación ns-3 llevando a cabo la implementación de un mecanismo de Adaptive Data Rate. Dicho mecanismo permite adaptar la velocidad de los datos dependiendo de las condiciones del canal.

El cuarto objetivo del trabajo es realizar las pruebas pertinentes para simular el mecanismo desarrollado. Una vez analizados los resultados se puede observar cómo existen posibles mejoras al mecanismo establecido por la norma.

Por último, se realiza una comparación de los resultados anteriores con las mejoras realizadas, de donde se pueden obtener varias conclusiones.

2.1 Metodología

2.1.1 Gestión del proyecto

Se han realizado las siguientes pruebas para estudiar el comportamiento de la mejora aportada a la herramienta de simulación ns-3.

- Primer contacto con la tecnología LoRaWAN realizando pequeñas simulaciones en clase C.
- Configuración de los dispositivos finales en clase B.
- Configuración del gateway.
- Estudio del despliegue real de la red LoRaWAN.
- Simulaciones de la red LoRaWAN en clase B.
- Implementación del mecanismo ADR para una simulación más realista.
- Estudio de los resultados obtenidos en las simulaciones.

2.1.2 Distribución de tareas

Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin
Estudio teórico	51 días	lun 04/11/19	lun 13/01/20
Primeras simulaciones clase C	11 días	mar 14/01/20	mar 28/01/20
Programación del nodo	25 días	lun 27/01/20	vie 28/02/20
Estudio despliegue	15 días	lun 24/02/20	vie 13/03/20
Programación del GW	22 días	lun 02/03/20	mar 31/03/20
Búsqueda alternativa	13 días	mié 01/04/20	vie 17/04/20
Simulaciones clase B	11 días	lun 20/04/20	lun 04/05/20
Definir escenario	10 días	mar 05/05/20	lun 18/05/20
Implementación ADR	39 días	mar 19/05/20	vie 10/07/20
Simulación del ADR en el escenario	10 días	lun 13/07/20	vie 24/07/20
Redacción del trabajo	150 días	mar 14/01/20	lun 10/08/20

Figura 2. Duración de las tareas realizadas.

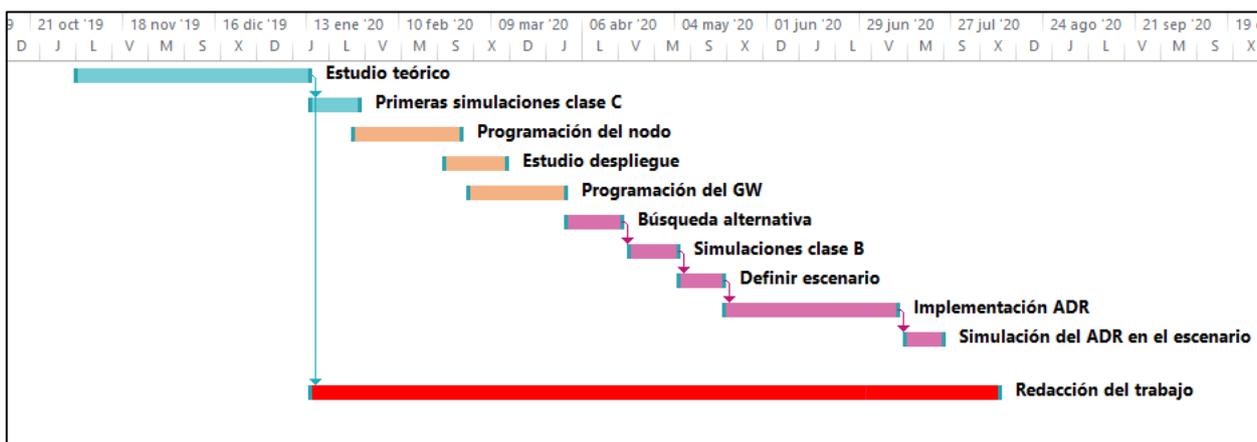


Figura 3. Diagrama temporal de las tareas realizadas.

En primer lugar, se realizó un estudio teórico para conocer más a fondo la tecnología que se iba a utilizar, para completar el conocimiento se realizaron las primeras simulaciones para observar su comportamiento. Estas dos actividades se muestran en azul en la Figura 3.

Una vez adquiridos los conocimientos, se empezó con la programación del nodo con el software “System Workbench for STM32”. A continuación, se empezó a estudiar los posibles escenarios para realizar el despliegue de la red LoRaWAN. Al mismo tiempo, se empezó con la programación del gateway, del servidor de red y del servidor de aplicaciones mediante ChirpStack. Estas tres actividades se muestran en naranja en la imagen anterior.

Debido a la crisis sanitaria del SARS-CoV-2, el trabajo se tuvo que replantear, dejando de lado el despliegue real de la red y empezando una búsqueda de posibles alternativas y analizando los simuladores que soporten clase B.

Una vez se dio con el simulador más apropiado que soportara la tecnología LoRaWAN, y en especial la clase B, se empezó con unas primeras simulaciones mediante la herramienta ns-3 de la clase B.



A continuación, se definió el escenario industrial con el que se iban a realizar las simulaciones. Una vez definido, se observó que el simulador no tenía implementado el mecanismo de Adaptive Data Rate, por lo que se decidió implementarlo para obtener unas simulaciones más realistas.

Una vez implementado el mecanismo, se comprobó que funcionase correctamente y se realizaron las simulaciones oportunas para llevar a cabo el estudio de la red en un entorno industrial 4.0. Estas seis últimas actividades se muestran en la Figura 3 de color morado.

Desde que se terminó el estudio teórico de la tecnología LoRaWAN hasta el final de las actividades se ha ido redactando el trabajo para no perder detalle de las actividades realizadas. Esta actividad se muestra en rojo en la Figura 3.

Capítulo 3. Estado del Arte LPWAN

En primer lugar, se va a realizar una aclaración sobre los conceptos de LoRa y LoRaWAN; para ello se van a detallar los conceptos para aclarar sus diferencias. Por último, se nombrarán algunas alternativas a dichas tecnologías.

3.1 LoRa

LoRa “Long Range” es la capa física, la modulación empleada para crear comunicaciones de largo alcance. LoRa se basa en el espectro ensanchado de Chirp extendido de modulación, lo que le permite conservar las mismas características de baja potencia, pero aumentando significativamente el rango de la comunicación.

LoRa es una implementación de capa PHY y es independiente de las implementaciones de capa superior. Esto permite que LoRa coexista e interopere con las arquitecturas de red existentes.

La modulación LoRa de Semtech aborda todos los problemas asociados con los sistemas DSSS para proporcionar una alternativa de bajo costo, baja potencia, pero sobre todo, robusta a las técnicas tradicionales de comunicaciones de amplio espectro.

3.1.1 Especificaciones técnicas

LoRa es una tecnología patentada, propiedad de Semtech Corporation, la cual trabaja en banda ISM. La asignación de los requisitos reglamentarios y la asignación de las frecuencias varía dependiendo de la región en la cual se quiere trabajar [5]. En la Tabla 1 se puede observar una diferencia de asignaciones entre Europa y América del Norte.

	Europa	América del Norte
Banda de frecuencia	863-870 MHz	902-928 MHz
Canal ascendente	125/250 kHz	125/500 kHz
Canal descendente	125kHz	500kHz
Canales	10	64+8+8
Tx ON	+14dBm	+30dBm permitidos
Tx OFF	+14dBm	+27dBm
Velocidad de los datos	250 bps – 50kbps	980 bps – 21.9 kbps

Tabla 1. Requisitos reglamentarios de LoRa en Europa y América del Norte [6].

El factor de propagación de las señales es variable. LoRa permite 6 factores de propagación (SF7 a SF12). Por otro lado, también permite 3 anchos de banda diferentes (125kHz, 250kHz y 500kHz). Tanto el SF como el BW permitidos están regulados por las agencias reguladoras.

Un determinado factor de propagación (SF) y ancho de banda (BW) definen una tasa de bits definida en la Ecuación 1.

$$\text{Bit Rate} = SF * \left(\frac{BW}{2^{SF}}\right) \quad (1)$$

LoRa es la tecnología de modulación que se usa en las redes LoRaWAN. Permite la transmisión de datos a bajo nivel entre dispositivos IoT, permite alcanzar grandes longitudes con un bajo consumo de energía y a una baja velocidad.



Algunas de sus características principales son:

- Bajo consumo.
- Largo alcance, de 10 a 20 kilómetros.
- Alta tolerancia a interferencias.
- Tamaño de payload limitado, hasta 255Bytes.
- Sin requerimiento de licencia en las bandas asignadas.
- Comunicación bidireccional.

Las frecuencias de trabajo de LoRa se muestran en la Tabla 2.

Zona geográfica	Frecuencia de trabajo
Europa	863-870 MHz
América	902-928 MHz
Asia	470-510 y 779-787 MHz
Australia	915-928 MHz

Tabla 2. Frecuencias de trabajo en distintas zonas geográficas.

3.1.2 Ventajas

Las ventajas más destacadas de LoRa son las siguientes:

- El uso de LoRa es gratuito y permite configurar redes personalizadas.
- El envío de mensajes es ilimitado con una velocidad de hasta 50 kb/s.
- Soporta un gran alcance (en ambientes urbanos el alcance es de varios kilómetros, debido a un mayor número de interferencias, y en ambientes rurales el alcance es de decenas de kilómetros).
- Uso de poca potencia, depende de la amplificación del radio.
- Permite elegir la frecuencia dentro del rango legalmente permitido.

3.1.3 Desventajas

Las desventajas más destacadas de LoRa son las siguientes:

- El usuario debe de administrar su red y los gateways.
- Los Chips disponibles son solo de SemTech y son bajo patente.

3.2 LoRaWAN

LoRaWAN es un protocolo de red, de nivel 2 como se muestra en la Figura 4, que trabaja con la tecnología LoRa. Permite la comunicación de dispositivos electrónicos empleados en el IoT. LoRaWAN se encarga de definir el protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema para la red, mientras que LoRa es de nivel 1, capa física que habilita el enlace de comunicación [7].

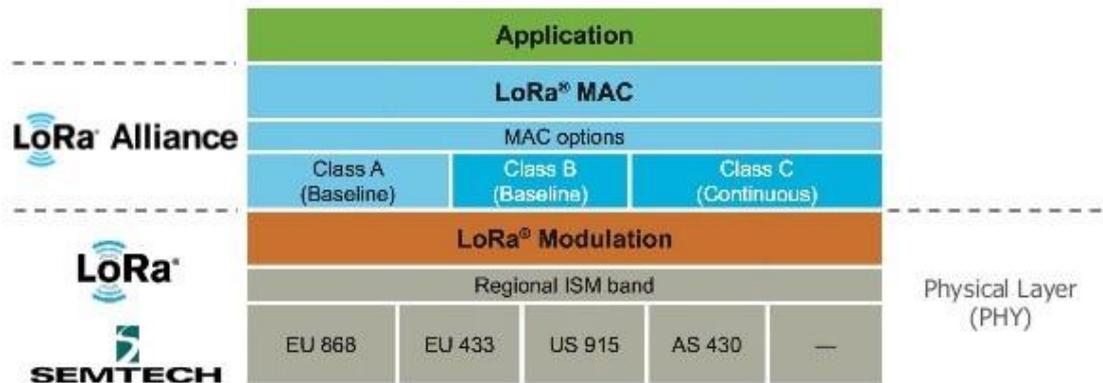


Figura 4. Pila de funcionamiento.

Alguna de las características principales de LoRaWAN son:

- Bajo consumo de batería y largo alcance.
- Payload reducido a causa de la información añadida por LoRaWAN.
- Posibilidad de usar redes públicas y privadas.
- Administración de los dispositivos.
- Comunicaciones encriptadas con AES-128.

3.2.1 Comunicación

LoRaWAN dispone de una infraestructura formada por nodos finales, gateways, un servidor y una aplicación final donde interactúa el usuario. La topología es de estrella ya que un gateway puede tener conectados varios nodos finales.

Muchas redes utilizan una red en malla, pero esto tiene varios pros y contras. Como ventajas el uso de una red mallada ofrece mayor rango de comunicación, pero ofrece varias desventajas como mayor complejidad de la red, reduce la capacidad de la red y también reduce la batería. Por todas estas desventajas la tecnología LoRaWAN usa una arquitectura de red en estrella, la arquitectura estelar tiene más sentido para pretender preservar la duración de la batería obteniendo una mayor conectividad a largo alcance. Pero para que una red estelar de largo alcance sea posible, la puerta de enlace debe tener la capacidad de poder conectar un gran número de nodos.

El hecho de poder obtener una alta capacidad de la red se logra usando una velocidad de datos adaptativa (ADR) y un transceptor multicanal en el gateway para poder recibir mensajes simultáneos en varios canales procedentes de distintos nodos. Pero la capacidad de la red se puede ver afectada por: el uso de múltiples canales, la frecuencia con los que los nodos transmiten, etc... A medida que el factor de propagación cambia, la velocidad de datos efectiva también cambia.

Otro de los puntos importantes de las comunicaciones en LoRaWAN es el tiempo de vida de la batería. Para ello, primero hay que tener en cuenta el comportamiento de los nodos. Los nodos son asíncronos y se comunican con los gateways cuando tienen algún dato para enviar, ya sea de forma programada o por eventos. Este tipo de protocolo podemos decir que es parecido al método Aloha. Dependiendo de la clase que se use, el consumo de la batería puede verse afectado ya que los nodos tienen que despertar para sincronizarse y dicha sincronización consume mucha batería y es el principal impulsor de la disminución de la vida útil de la batería.

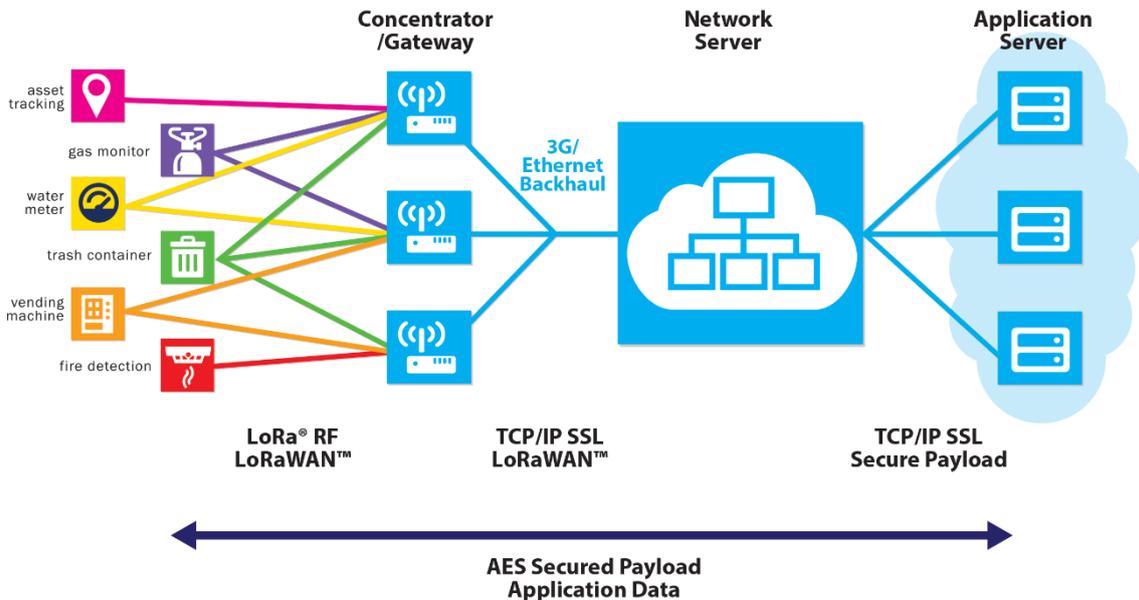


Figura 5. Comunicación entre los dispositivos finales y el servidor de aplicaciones [8].

3.2.2 Clases de los nodos

Clase A

Los nodos de clase A permiten una comunicación bidireccional, pero con la limitación de que es necesario enviar un paquete de subida para recibir un paquete de bajada, como se observa en la Figura 7. Dicho paquete puede contener el ACK o datos procedentes de la aplicación.

La transmisión de subida va seguida de dos ventanas de recepción de enlace de bajada cortas. Las ranuras de transmisión están programadas por el nodo y se basa en las necesidades de comunicación de este con la aplicación.

La clase A es la de menor consumo ya que las transmisiones están programadas y una vez finalizada la actividad el nodo entra en un estado de suspensión hasta el próximo tiempo de transmisión [9].

Clase B

Los nodos de clase B permiten una comunicación bidireccional, pero con ranuras de recepción ya programadas. Los nodos de clase B actúan como los de clase A, pero incluye ventanas de recepción ya programadas.

Para sincronizar los tiempos entre el nodo y el servidor, se envían balizas de tiempo para sincronizarse. Esta sincronización se logra mediante el uso de balizas emitidas por el gateway cada 128 segundos, como se observa en la Figura 6. De esta forma el servidor sabe en qué

momento el nodo está escuchando y en caso de tener paquetes a enviar lo puede realizar, siempre respetando las limitaciones de Duty Cycle.

El consumo de la batería en estos dispositivos es superior a los de clase A, porque permanece mayor tiempo activo [9].

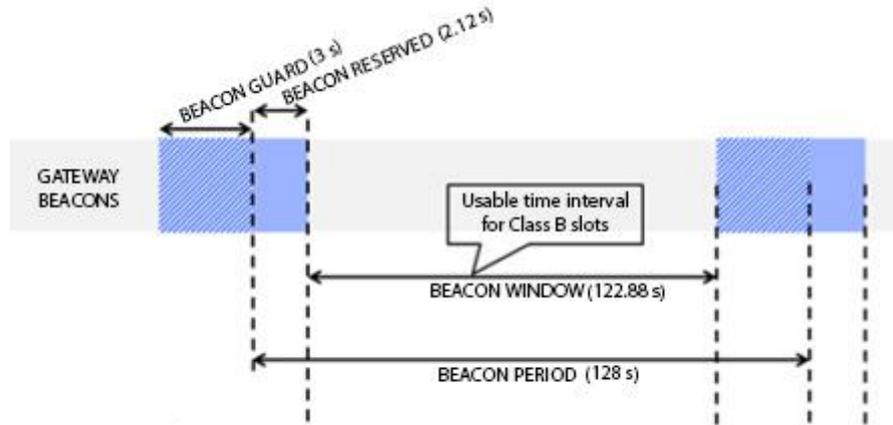


Figura 6. Comunicaciones de los dispositivos de clase B.

Clase C

Los nodos de clase C permiten una comunicación bidireccional. A diferencia de los de clase A y B, estos permiten una comunicación de bajada en todo momento a excepción de cuando el nodo está transmitiendo, siempre respetando el Duty Cycle.

El consumo de la batería es superior ya que el nodo permanece siempre activo; esta es la mayor desventaja que presentan los nodos de clase C [9].

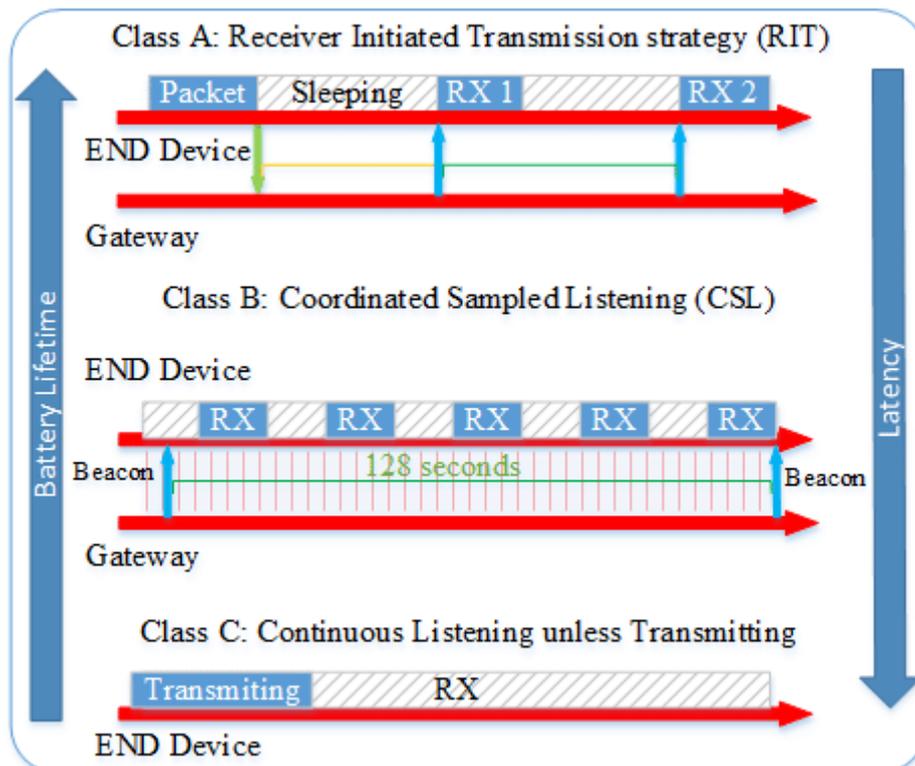


Figura 7. Funcionamiento de las distintas clases de LoRaWAN.

3.2.3 Duty Cycle

El Duty Cycle (Ciclo de Trabajo) es la fracción de tiempo en la cual el dispositivo se encuentra ocupado.

El Duty Cycle en Europa está regulado por la sección 7.2.3 del estándar ETSI EN300.220. Estos límites deben de cumplirse a la hora de transmitir un mensaje, por lo que se deben de tener en cuenta a la hora de programar el envío de mensajes. En la siguiente tabla se pueden observar los límites de Duty Cycle para cada una de las sub-bandas.

Bandas de frecuencia	Aplicación	Máxima potencia radiada	Duty Cycle
868,000 – 868,600 MHz	Sin uso específico	25 mW	1%
868,600 – 868,700 MHz	Alarmas	10 mW	1%
868,700 – 869,200 MHz	Sin uso específico	25 mw	0,1%
869,200 – 869,250 MHz	Alarmas sociales	10 mW	0,1%
869,250 – 869,300 MHz	Alarmas	10 mW	0,1%
869,300 – 869,400 MHz	Alarmas	10 mW	1%
869,400 – 869,650 MHz	Sin uso específico	500 mW	10%
869,650 – 869,700 MHz	Alarmas	25 mW	10%
869,700 – 870,000 MHz	Sin uso específico	25 mW	1%

Tabla 3. Límites del Duty Cycle para las distintas bandas de frecuencia. [10].

Como se puede observar en la Tabla 3, dependiendo de la aplicación que se vaya a aplicar, se podrá elegir entre varias sub-bandas de frecuencia, potencia y Duty Cycle que nos venga más apropiado.

3.2.4 Adaptive Data Rate

El mecanismo de Adaptive Data Rate (ADR) permite adaptar la velocidad de los datos dependiendo del estado de la red. Este mecanismo permite optimizar el tiempo en el aire, el consumo de energía de los dispositivos finales y el ahorro de recursos en la red. Los dispositivos finales son los que deciden si usar o no ADR [11].

Si el dispositivo final decide activar el mecanismo de ADR, este realizará las siguientes funciones:

1. El nodo envía un mensaje de subida con el bit de ADR activado.

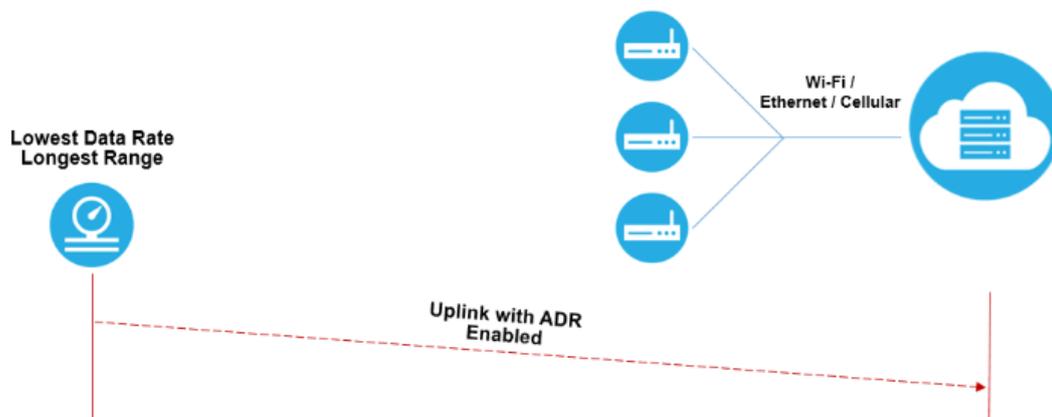


Figura 8. Mensaje de subida activando el mecanismo de ADR.

2. El servidor almacena los 20 últimos mensajes de subida y determina el valor de señal a ruido (SNR) de cada uno. Una vez han llegado los 20 mensajes se calcula el SNR máximo de los 20 mensajes. Con el valor calculado, el gateway decide si aumenta el SF o lo mantiene mediante las Ecuaciones (2) y (3). En caso de aumentar el SF se incrementa de uno en uno, paso a paso y en caso de mantenerlo se incrementa 3dB la potencia de transmisión. En la siguiente tabla se pueden observar los límites para el cambio de Spreading Factor.

$$\text{SNR}_{\text{margin}} = \text{SNR}_{\text{max}} - \text{requiredSNR} - \text{margin} \quad (2)$$

$$N_{\text{step}} = \text{round} \left(\frac{\text{SNR}_{\text{margin}}}{3} \right) \begin{cases} < 0 & \text{Pot. de TX incrementa 3dB} \\ > 0 & \text{DR} = \text{DR} + 1 \text{ (hasta DR5)} \end{cases} \quad (3)$$

Donde:

SNRmax = max SNR de los 20 últimos mensajes recibidos.
margin = 10 (por defecto)

Spreading Factor	requiredSNR
SF 7	-7,5 dB
SF 8	-10 dB
SF 9	-12,5 dB
SF 10	-15 dB
SF 11	-17,5 dB
SF 12	-20 dB

Tabla 4. Límite SNR de cada SF para el ancho de banda de 125 kHz.

3. Una vez calculado el promedio de SNR, determina el link Budget disponible y la velocidad de datos a la que puede incrementar. Solo puede incrementar de uno en uno. Una vez determinada la velocidad, se le comunica al nodo con un mensaje de bajada.

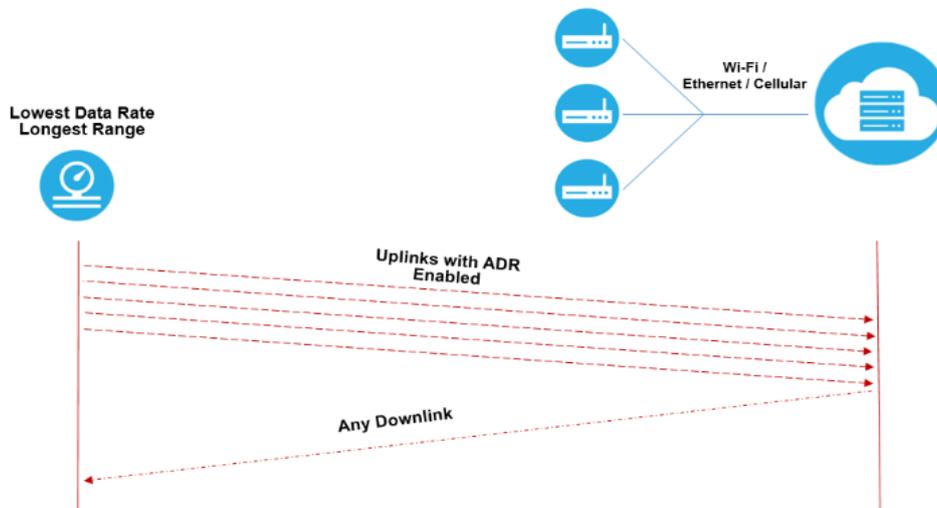


Figura 9. Envío del mensaje por parte del servidor con el nuevo SF.

7. El nodo continúa enviando mensajes al servidor (a esta nueva velocidad de datos más baja) solicitando un reconocimiento de ADR. Ahora el nodo puede que reciba ya el paquete de confirmación de la aplicación. En caso de no ser así, sigue reduciendo el SF hasta recibir información de la aplicación.

3.2.5 Seguridad

La seguridad es uno de los puntos más importantes a día de hoy y en vista al futuro, pero debe de estar adaptada a las normas de diseño de LoRaWAN como el coste, el consumo de energía, la alta escalabilidad, etc....

La seguridad se debe adherir a principios de vanguardia como el uso de algoritmos estándar y seguridad en los extremos.

Los mensajes entre el dispositivo final y el servidor de aplicaciones siempre se cifran. Se proporciona una protección de integridad salto a salto, de un extremo a otro. Existen dos saltos: salto por aire hacia/desde el dispositivo final y el salto entre la red y el servidor de aplicaciones por transporte seguro como HTTPS y VPN [12].

En primer lugar, el salto por aire conlleva una activación por aire, lo que muestra que tanto el dispositivo final como la red conocen la AppKey. Para corroborarlo, se utiliza una prueba calculando el AES-CMAC4, en la petición de unión del dispositivo final. A continuación, una vez corroborado el paso anterior, se envían dos claves de seguridad para la sesión. Una clave para proporcionar integridad y cifrado de los comandos LoRaMAC y la carga de la aplicación, NwkSKey. La otra clave proporciona cifrado entre los extremos de la aplicación, AppSKey.

La clave NwkSKey se envía por la red LoRaWAN para verificar la autenticidad e integridad de los paquetes enviados.

La clave AppSKey se envía al servidor de aplicaciones para poder cifrar/descifrar los mensajes de la aplicación. Tanto la AppSKey como la AppKey se pueden esconder.

En la Figura 12 se muestra el uso de las claves comentadas anteriormente.

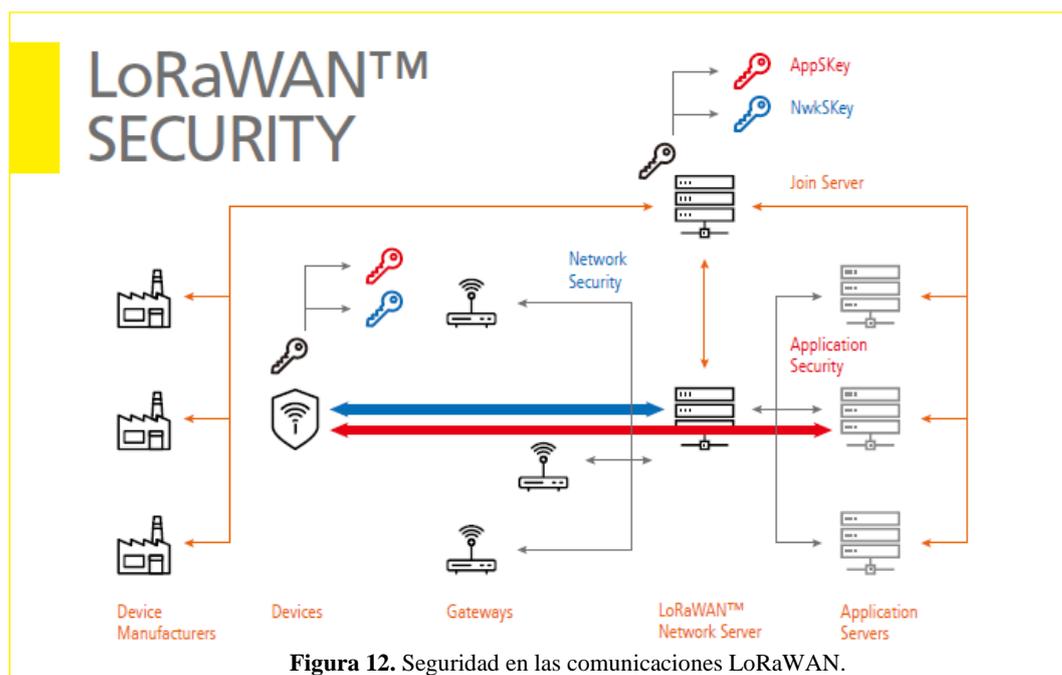


Figura 12. Seguridad en las comunicaciones LoRaWAN.

Como se muestra en la Figura 12, en todo momento el tráfico LoRaWAN está protegido mediante las dos claves de sesión NwkSKey y AppSKey.

Para evitar la reproducción de los mensajes, cada mensaje está encriptado por AES-CTR y se le añade un contador de trama. Por otro lado, para proteger el mensaje de posibles manipulaciones, se añade un código de integridad de mensajes, MIC, calculado por AES-CMAC.

La Figura 13 muestra la estructura de un mensaje, donde se puede observar la protección que lleva cada mensaje.

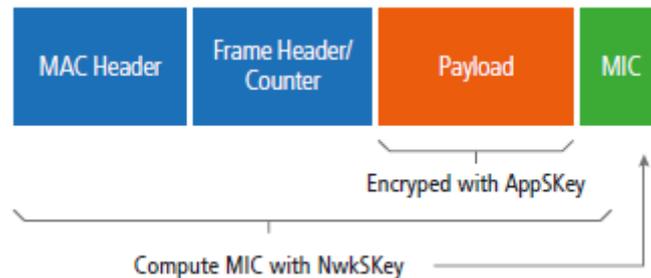


Figura 13. Estructura del mensaje.

3.3 Otras tecnologías

En el mundo del IoT existen multitudes de tecnologías inalámbricas de bajo consumo. Por este motivo se van a comentar algunas de las tecnologías punteras de hoy en día, pero dependiendo del caso de uso unas son mejores que otras.

Para ello se va a realizar un análisis de las tecnologías existentes con características similares a LoRa y LoRaWAN.

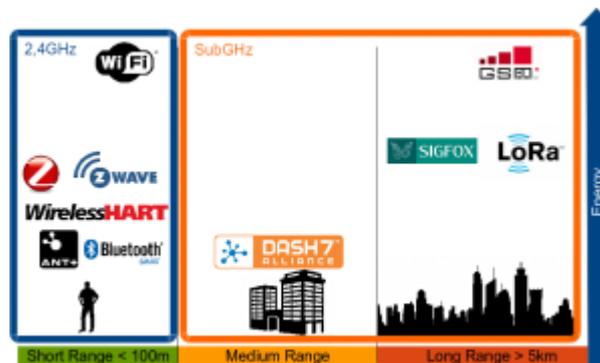


Figura 14. Tecnologías LPWAN.

3.3.1 SIGFOX

Es una tecnología que permite la conectividad de los dispositivos para el Internet of Things. Es una solución para cuando se requiere comunicaciones de baja velocidad con un consumo de energía y un precio reducido. SIGFOX se basa en el uso de una infraestructura de antenas y estaciones base independientes de las redes ya existentes [13].

SIGFOX es una tecnología de largo alcance, se encuentra entre la tecnología Wi-Fi y las comunicaciones móviles. Su uso es sin licencia, ya que utiliza las bandas ISM. Hace uso de la tecnología Ultra Narrow Band (UNB) la cual permite que funcione a bajas velocidades de transferencia de 10 a 1.000 bits por segundo.

Esta tecnología es una solución apropiada para muchas aplicaciones M2M que funcionan con poca batería y solo requieren niveles menores de transferencia de datos, donde el WiFi no llega y las comunicaciones móviles son muy caras y consume demasiada energía.

A continuación, se van a ver las ventajas y desventajas de dicha tecnología.

- Ventajas:
 - Largo alcance, hasta 40 km en áreas rurales.
 - Baja potencia.
 - Bajo coste.
- Desventajas:
 - Servicio de pago por suscripción.
 - Comunicaciones muy lentas, 100 bytes por segundo.
 - Límite de mensajes de subida y bajada al día, 140 x 12 bytes de subida y 4 x 8 bytes de descarga.
 - La frecuencia está fija por ubicación y no en todas las ubicaciones hay cobertura.

3.3.2 DASH7

El Protocolo de Alianza DASH7 (D7A) es un protocolo de red de Sensor y Actuador Inalámbrico de código abierto, que opera en la banda ISM / SRD sin licencia de 433 MHz, 868 MHz y 915 MHz. Se especifica una pila OSI completa (7 capas OSI) conocida como protocolo D7A (D7AP).

DASH7 proporciona una duración de batería de varios años, un alcance de hasta 2 km, baja latencia para conectarse con cosas en movimiento, una pila de protocolos de código abierto muy pequeña, soporte de cifrado de clave compartida AES de 128 bits y transferencia de datos de hasta 167 kbit/s. El Protocolo de DASH7 Alliance es el nombre de la tecnología promovida por el consorcio sin fines de lucro llamado DASH7 Alliance [14].

Algunas de las características de D7A son:

- Bursty: Transmite secuencias de datos cortas y esporádicas.
- Light: el tamaño de los paquetes es pequeño ya que está limitado a 256 bytes.
- Asynchronous: sin sincronización periódica.
- Stealth: no necesita el uso de balizas de descubrimiento periódicas, el nodo se comunica con el gateway preaprobado.
- Transitive: sin problemas de movilidad, soporta la movilidad del nodo ente diferentes coberturas de gateway.

En cuanto a la comunicación, se definen dos modelos para la comunicación entre el gateway y el nodo, como se muestra en la Figura 15.

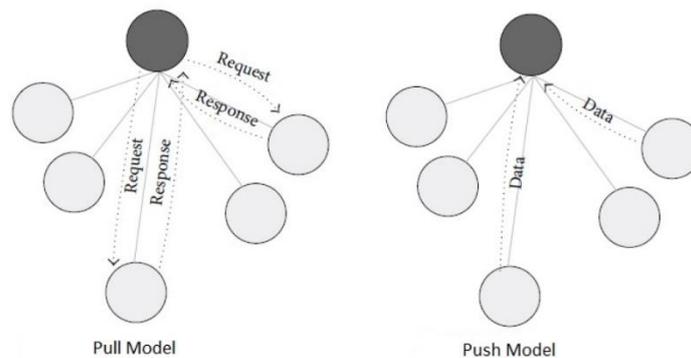


Figura 15. Modelos de comunicación entre el gateway y los nodos.

El primer modelo, Pull Model, se basa en un mecanismo de solicitud/respuesta. Es el gateway quien lo inicializa y se describe mediante la transferencia de datos del protocolo de consulta D7A (protocolo de capa de red).

El segundo modelo, Push Model, se basa en la inserción de datos que utiliza el protocolo de acción D7AP (D7AActP) (protocolo de capa de aplicación). El modelo Push es efectivo en muchos casos ya que permite el ahorro de energía con un uso eficiente del espectro.

3.3.3 NB-IoT

NB-IoT, Narrow Band Internet of Things, fue configurado por 3GPP para solucionar las necesidades de baja velocidad de datos y necesita conectarse a una red móvil. Define una nueva tecnología de acceso vía radio que puede integrarse en el estándar LTE. Opera en las mismas frecuencias con licencia utilizadas por LTE. Emplea modulaciones QPSK y BPSK. Hay que dejar claro que NB-IoT no es ningún protocolo de comunicación basado en IP [15].

NB-IoT se usa en el caso de que tengamos una pequeña cantidad de datos a enviar o recibir a una velocidad de modulación más rápida que otras tecnologías, como SIGFOX o LoRa. La capa física está diseñada para ajustarse al ancho de banda del sistema de 200 kHz, utilizando tanto el enlace ascendente como por el enlace descendente.

Algunas de las características de NB-IoT son:

- Standalone: reemplazar un operador GSM con una celda NB-IoT.
- Guard-Band: se aprovecha de los recursos no utilizados dentro de la banda de protección de LTE.
- In-Band: uso de uno o más Physical Resource Blocks (PRBs) que están reservados para NB-IoT.

Esta tecnología aún está en desarrollo, pero está pensado que NB-IoT se use en dispositivos sencillos que necesiten conectarse a una red de operadores, a través de un espectro el cual se necesite una licencia.

En cuanto a las comunicaciones, a diferencia de la tecnología LPWAN, depende de la arquitectura LTE y debe de coexistir con dicha tecnología sin la posibilidad de introducir modificaciones a la arquitectura y la estructura de la red celular. Es una tecnología half-duplex la cual habilita las comunicaciones de subida. Esto quiere decir que permite establecer conexión a la red celular, asignar la cantidad de recursos de red al nodo y la transmisión de los datos.

A continuación, se van a comentar las ventajas y desventajas de la tecnología NB-IoT [16]:

- Ventajas:
 - Muy buena cobertura, sobre todo en ambientes urbanos ya que depende de la cobertura 4G.
 - Tiempos de respuesta rápidos.
 - Garantiza una mejor calidad de servicio.
- Desventajas:
 - Difícil de implementar el firmware por aire.
 - De pago, ya que requiere una suscripción y una licencia.

3.4 Casos de uso

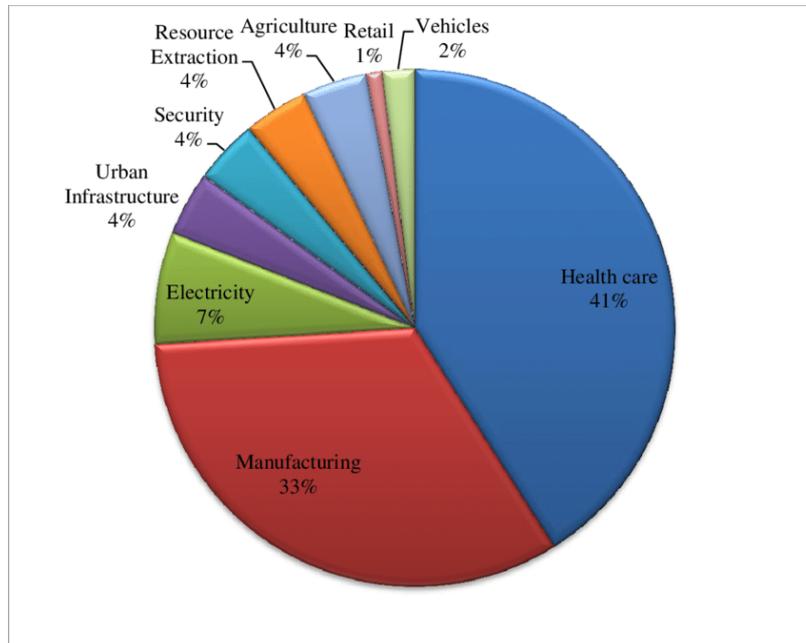


Figura 16. Casos de uso de la tecnología LoRaWAN [17].

Industria:

Un área que se ha beneficiado enormemente del desarrollo de tecnologías IoT, como se evidencia, es la de la industria y la fabricación. La primera ola de automatización y digitalización en la industria comúnmente conocida como Industria 3.0 comenzó en 1969 cuando Modicon presentó el primer controlador lógico programable que permitió la programación digital de sistemas de automatización.

Esta transformación comenzó un cambio de paradigma total en el mundo de la industria, y al hacerlo, también sentó las bases para su sucesor.

La predecible Industria 4.0, aún en sus primeras etapas, es la sucesora de esta ola de automatización. Sobre la base de los avances de su predecesor, las cinco características principales de la Industria 4.0 se definen como: digitalización, optimización, personalización de la producción, automatización y adaptación, Interacción hombre-máquina (HMI).

Smart Cities:

Otra área en la que se han desarrollado IoT son las Smart Cities.

Cada año que pasa, todas las ciudades importantes del mundo están cada vez más conectadas. Ya se trate del alumbrado público adaptable, información del número de pasajeros en tiempo real para sistemas de transporte o monitoreo ambiental en los centros de las ciudades.

Con los gobiernos cada vez más conscientes de los beneficios que la tecnología puede aportar a una ciudad, es solo cuestión de tiempo hasta que comencemos a ver una demanda muy alta de infraestructura con IoT.



Ganadería y agricultura:

Una aplicación de la tecnología IoT que ha experimentado un rápido crecimiento, especialmente en Irlanda, pero sin limitarse a ella, es el área de la agricultura inteligente. Este es un ejemplo de un caso de uso para la tecnología IoT donde se pueden realizar grandes mejoras mediante su introducción en la vida diaria de los agricultores, para monitorear el clima y las condiciones del suelo.

Por otra parte, en la ganadería también se está implantando la tecnología IoT para aumentar la producción, ya sea monitorizando el ambiente, las condiciones físicas del animal o controlar su alimentación.

Sanidad:

En el ámbito de la sanidad siempre se están buscando alternativas para mejorar la calidad de vida de las personas, es aquí donde entra también en juego la tecnología IoT. Las apuestas en este ámbito no permiten errores o daños innecesarios debido a fallos humanos. Es por ello que continuamente se estén buscando nuevas tecnologías para mejorar la experiencia del paciente y reducir los errores e ineficiencias.

Capítulo 4. Trabajo previo sobre la tecnología LoRaWAN

4.1 Estudios previos

Previamente, antes de empezar con el trabajo, se ha realizado un estudio de la literatura existente para comprender los distintos escenarios que se han estudiado con anterioridad.

En el artículo [18] muestra el estudio de una simulación realizada con la tecnología LoRaWAN y dispositivos de clase B. Los dispositivos se han distribuido en un radio de 6100m. Las simulaciones que se han llevado a cabo han sido variando las limitaciones del canal, con el 1% y el 10%, para estudiar el comportamiento del enlace descendiente. En este trabajo se pudo observar cómo en ningún momento se tuvo en cuenta el impacto del mecanismo de ADR, ya que el SF se mantenía estático en todas las simulaciones.

En el artículo [19], se realiza un análisis del mecanismo de ADR mediante varias simulaciones. Para ello, se emplea el simulador LoRaWANSim para el estudio del mecanismo. En este artículo se ha elegido un ciclo de trabajo del 1% y un radio de distancia de 670m. Los resultados muestran el comportamiento de la red para distinto número de nodos. En este trabajo se ha empleado un simulador el cual se encuentra en desuso y, por otro lado, no analiza el funcionamiento de los nodos de clase B.

Otro artículo que se ha estudiado es el [20], en el cual, al igual que en nuestro trabajo, se analiza el comportamiento en un escenario industrial. La tecnología empleada es LoRaWAN con dispositivos de clase A. En este caso las simulaciones también se han realizado con el simulador ns-3. Las simulaciones se han realizado con distinto número de nodos, de 10 a 1000, dentro de un radio de 200m. Las simulaciones se han realizado con un SF constante, comparando las probabilidades de éxito en las simulaciones, con un SF=7 y un SF=12. Por otro lado, el consumo de batería también se ha comparado con otras tecnologías como IEEE 802.15.4. En este caso, al igual que en el primer caso, no analiza el comportamiento del mecanismo de ADR ya que en todo momento el SF permanece estático.

En el artículo [21], los autores analizan la posibilidad de optimizar el rendimiento modificando el SF utilizado. Pero en este caso, en lugar de utilizar el mecanismo de ADR, se ha elegido el método de proyección de gradiente. Las simulaciones se realizan para una cantidad variable de nodos, de los 10 a los 10000, en los cuales se utiliza un SF=7, SF=8 y SF=9. El artículo por lo tanto nos presenta una posible mejora, pero no lo compara con el mecanismo de ADR establecido por la norma.

En el artículo [22], se analiza un nuevo simulador llamado LoRa-MAB. En él, se evalúa el rendimiento de LoRaWAN con 100 nodos, en los cuales existe la posibilidad de seleccionar uno de los 6 SF disponibles del 7 al 12. Los nodos se distribuyen en un radio de 4,5km con una limitación del ciclo del 1%. En este caso, el algoritmo empleado por el simulador mejora el rendimiento de LoRaWAN en valor de los paquetes exitosos y el consumo de energía. Por el contrario, los tiempos de conexión son demasiados largos. En este artículo, como en varios de los anteriores, el mecanismo empleado es una alternativa al mecanismo ADR.

Por último, en el artículo [23], se presenta un algoritmo llamado FADR, el cual se pone a prueba con el simulador LoRaSim. La simulación se realiza para una cantidad variable de nodos, de 100 a 4000, dentro de un radio de distancia variable, de 100 a 3200 metros. Dicho mecanismo controla la potencia de transmisión, pero no puede eliminar por completo las colisiones.

Haciendo un pequeño resumen de los distintos artículos estudiados, en muchos de los trabajos no tienen en consideración el mecanismo de ADR, por otro lado, muchos tampoco contemplan la clase B de la tecnología LoRaWAN. Se ha podido observar cómo en muchos de ellos se ofrece una alternativa, pero nunca se llega a comparar con el mecanismo de ADR establecido en la norma.

Es por ello por lo que en este trabajo se ha querido realizar el estudio del mecanismo de Adaptive Data Rate en la tecnología LoRaWAN, en nodos de clase B.

Por otro lado, también se ha observado una carencia en el estudio de la tecnología en entornos industriales, es por ello que también se ha escogido el escenario industrial para realizar las simulaciones ya que es un escenario poco estudiado y es de gran interés.

4.2 Primer contacto con la tecnología LoRaWAN

Para empezar, un primer contacto con la tecnología LoRaWAN ha sido empezar con las simulaciones de clase C. Las simulaciones se han realizado con el simulador arm MBED [24] junto con el simulador de red The Things Network [25].

En primer lugar, en el simulador The Things Network se configura la red LoRaWAN. Este simulador nos ofrece un conjunto de herramientas de acceso libre para la construcción de aplicaciones IoT. Ofrece una gran seguridad, con cifrados de extremo a extremo. Primero se llevó a configurar el servidor de aplicaciones, donde se registra el número de dispositivos finales que se vayan a utilizar.

Para configurar los dispositivos se selecciona el método de activación, en este caso por OTAA. También es necesario la configuración de las claves Device EUI, Application EUI y App Key, que usaremos posteriormente para el simulador arm MBED.

En segundo lugar, se debe configurar un gateway, en el cual se configura la frecuencia a la que se va a trabajar, la clave Gateway Key y la localización geográfica en la que se quiere ubicar el gateway.

Una vez configurado el simulador The Things Network se procede a la configuración del simulador arm MBED.

Para ello en primer lugar se debe cargar el ejemplo de LoRaWAN. Una vez cargado debemos cambiar el valor de las variables DEV_EUI, APP_EUI y APP_KEY por el valor de las claves de los dispositivos configurados en el simulador The Things Network. En este simulador se simula un sensor que envía y recibe información de un servidor de aplicaciones. Dicho sensor envía datos de temperatura y humedad.

Mediante el simulador The Things Network se pueden observar los mensajes recibidos del dispositivo final. Como las simulaciones son de clase C, también podemos enviar mensajes al dispositivo final con una mayor frecuencia que a los de clase B. En la Figura 17 se pueden observar los mensajes recibidos en el servidor de aplicaciones procedentes del dispositivo final y en la Figura 18 los mensajes recibidos en el dispositivo final procedentes del servidor.

The screenshot shows the 'APPLICATION DATA' section of the The Things Network interface. It includes a breadcrumb trail: Applications > primera_prueba > Devices > device_1 > Data. There are 'pause' and 'clear' buttons. Below, there are filter tabs for 'uplink', 'downlink', 'activation', 'ack', and 'error'. A table displays the received data:

time	counter	port	payload
16:27:36	1	15	payload: 54 65 6D 70 65 72 61 74 75 72 65 20 3D 20 33 32 2E 39
16:27:21	0	15	retry payload: 54 65 6D 70 65 72 61 74 75 72 65 20 3D 20 32 30 2E 35

Figura 17. Mensajes recibidos en el servidor.

Serial output

```
Sending 18 bytes: "Temperature = 32.9"
[INFO][LMAC]: RTS = 18 bytes, PEND = 0, Port: 15
[DBG ][LMAC]: Frame prepared to send at port 15
[DBG ][LMAC]: TX: Channel=6, TX DR=4, RX1 DR=4
[DBG ][LRAD]: transmit channel=867700000 power=13 bandwidth=7 datarate=8
18 bytes scheduled for transmission
[DBG ][LSTK]: Transmission completed
[DBG ][LMAC]: RX1 slot open, Freq = 867300000
[DBG ][LMAC]: RX2 slot open, Freq = 869525000
Message Sent to Network Server
Sending 18 bytes: "Temperature = 32.9"
[INFO][LMAC]: RTS = 18 bytes, PEND = 0, Port: 15
[DBG ][LMAC]: Frame prepared to send at port 15
[DBG ][LMAC]: TX: Channel=4, TX DR=4, RX1 DR=4
[DBG ][LRAD]: transmit channel=867300000 power=13 bandwidth=7 datarate=8
18 bytes scheduled for transmission
[DBG ][LSTK]: Transmission completed
[DBG ][LRAD]: ][LSTK]: Transmission completed
[DBG ][LMAC]: RX1 slot open, Freq = 867700000
[DBG ][LSTK]: Packet Received 2 bytes, Port=15
Message Sent to Network Server
Received message from Network Server
Data received on port 15 (length 2): ca fe
```

Figura 18. Mensaje recibido en el nodo.

Una vez realizadas las simulaciones oportunas y visto el comportamiento de los dispositivos se procede a la configuración de los dispositivos finales y del gateway.

4.3 Configuración del dispositivo final

Para el despliegue de la red se ha acordado el uso de 10 dispositivos finales. Hay que seleccionar el tipo de dispositivo a emplear y para ello se debe hacer un estudio de mercado para encontrar el dispositivo que más se adapte a nuestras necesidades, y al mismo tiempo, que tenga una calidad/precio razonable.

Para ello se ha decidido emplear el dispositivo STM32L072CZY6TR, el cual se muestra en la Figura 19. Esta clase de dispositivos nos permite configurar una red LoRaWAN para clase B. El precio de este dispositivo en la página web oficial del producto es de \$4,16, lo que equivale a 3,53 euros. Si elegimos un total de 10 dispositivos finales, el precio total es de 35,30 euros.



Figura 19. Dispositivo final STM32L072CZY6TR

Para la configuración de los dispositivos se ha empleado el programa System Workbench for STM32, mediante el cual se ha cargado el código de acceso libre disponible en el repositorio GitHub [26]. De esta forma los dispositivos ya están configurados como dispositivos de clase B.

Una vez configurado los dispositivos finales es hora de programar el gateway y empezar con el estudio del despliegue.

4.4 Configuración del gateway

Para la parte del gateway, se ha decidido escoger dos dispositivos para futuras pruebas. Se ha realizado otro estudio de mercado para saber cuál es la mejor elección. En este caso, la mejor elección es LoRaGo PORT – Multi-channel LoRaWAN Gateway de la casa Sandbox Electronics, el cual se puede observar en la Figura 20. Este gateway permite el uso de LoRaWAN en múltiples canales. El precio de este dispositivo es de \$149,95, lo que equivale a 127,19 euros. El importe total al haber comprado dos gateways es de 254,38 euros.



Figura 20. LoRaGo PORT – Multi-channel LoRaWAN Gateway.

Para el uso de estos dispositivos es también necesario el uso de una Raspberry, en este caso se ha empleado la Raspberry Pi 3 Model B, como se muestra en la Figura 21. El precio de este dispositivo es de 39,90 euros, pero en nuestro caso eran necesarias dos Raspberrys por lo que el precio total de ambas es de 79,80 euros.



Figura 21. Raspberry Pi 3 Model B.

Una vez montados los gateways se ha procedido a la configuración. Para ello se ha instalado el sistema operativo de ChirpStack Gateway OS [27]. Este sistema operativo embebido está basado en Linux y es de código abierto. Una vez configurado el gateway, se procede con la configuración del servidor de red y el servidor de aplicaciones.

Para el servidor de red se ha empleado ChirpStack Network Server [27], el cual es una implementación del servidor de red LoRaWAN de acceso libre. Una vez configurado el servidor de red en el ordenador en el que vamos a trabajar se procede a la configuración del servidor de aplicaciones.

Para el servidor de aplicaciones se ha empleado ChirpStack Application Server, también de la familia ChirpStack [27]. Este servidor es de código libre y es el responsable de almacenar la información de los dispositivos finales en una red LoRaWAN, así como también el responsable de manejar las solicitudes de unión y el manejo del cifrado. Este servidor ofrece una interfaz web que permite administrar los dispositivos, registrar los eventos en vivo y descubrir los gateways,

así como su ubicación. En la Figura 22 se puede observar la interfaz web del servidor de aplicaciones.

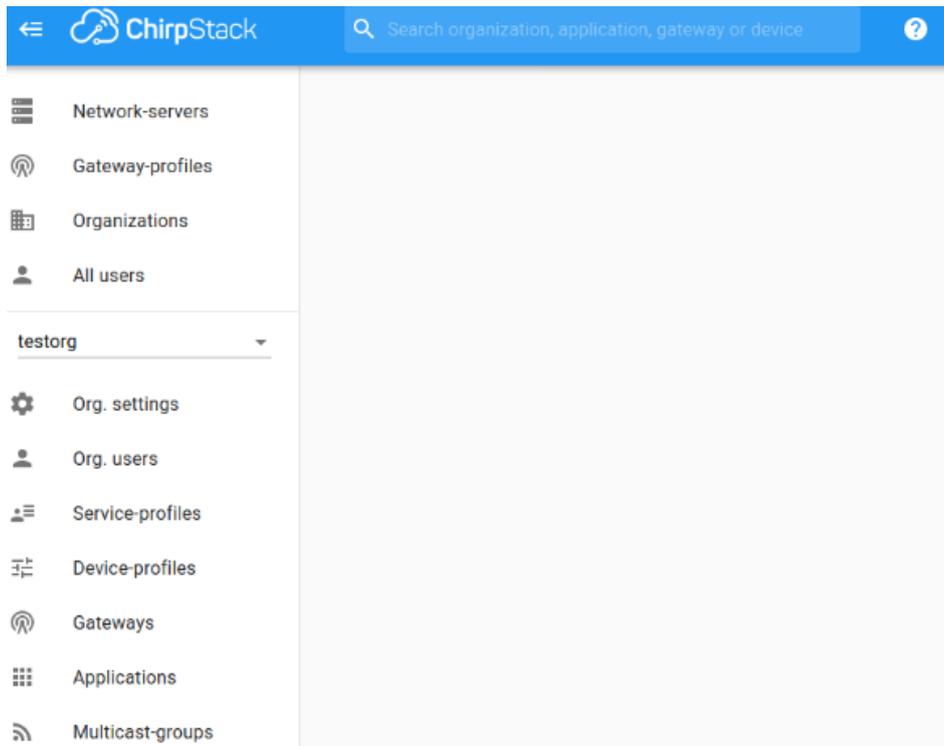


Figura 22. Interfaz servidor de aplicaciones.

4.5 Estudio del despliegue

Una vez configurados todos los elementos de una red LoRaWAN, se procede al estudio de su despliegue. Para ello en primer lugar se ha realizado el estudio de los escenarios donde realizarlo.

El primer escenario escogido para realizar el despliegue es un escenario outdoor con dos variantes:

-La primera variante con el gateway y los nodos al mismo nivel. Para ello se distribuyen los nodos por la planta baja del Instituto universitario de investigación y centros de investigación de la Universitat Politècnica de València. La planta baja tiene una superficie de 195m x 90m y con algunos obstáculos para simular un ambiente industrial como se muestra en la Figura 23.

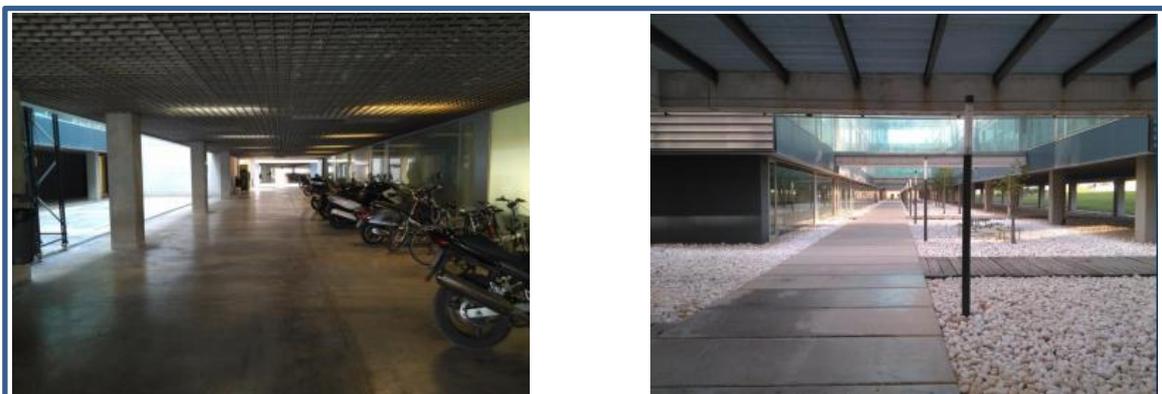


Figura 23. Planta baja del Instituto universitarios de investigación y centros de investigación.

-La segunda variante con el gateway y los nodos a distintos niveles. Para ello el gateway se ubica en la segunda planta, dentro de las instalaciones del ITI, como se muestra en la Figura 24. Cinco de los dispositivos finales se ubican en la planta inferior, como se observa en la Figura 25a y los otros 5 en la planta superior, como se muestra en la Figura 25b.



Figura 24. Niveles del edificio de Investigación.

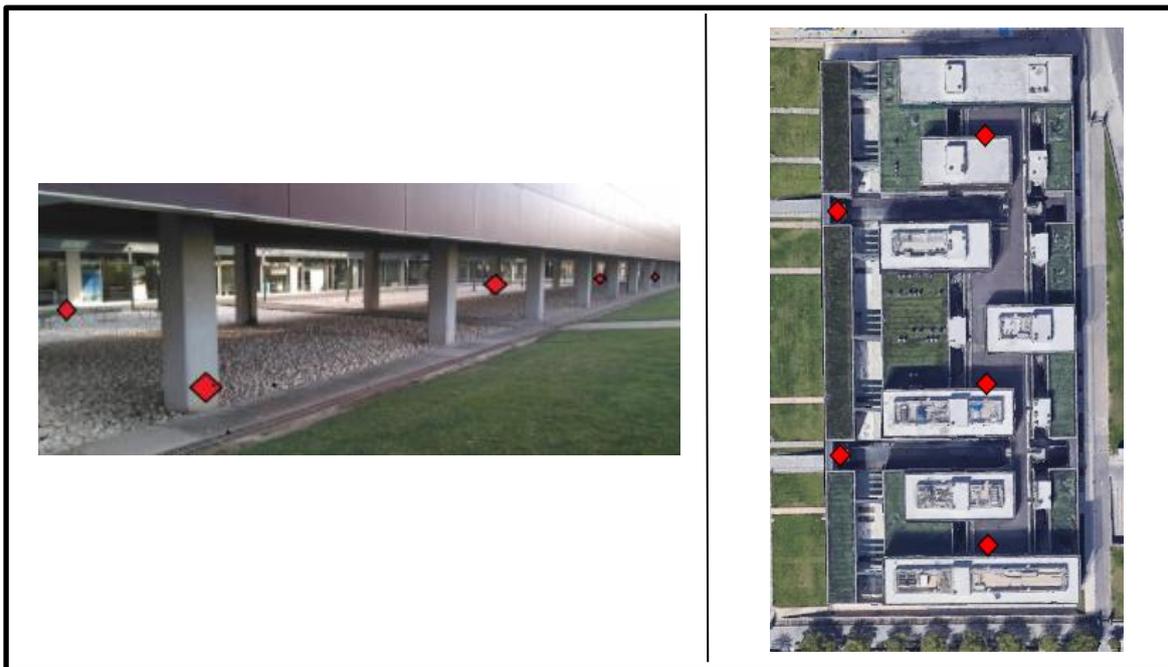


Figura 25. a) Despliegue en el nivel inferior, b) Despliegue en el nivel superior.

El segundo escenario escogido es un escenario outdoor dentro del campus de Vera, con el gateway en la planta superior del edificio 8G y los nodos distribuidos por el campus como se muestra en la Figura 26.



Figura 26. Despliegue con un gateway dentro del campus de Vera.

El tercer y último escenario planteado, también es un escenario outdoor pero con dos gateways, como se muestra en la Figura 27. De esta forma se podrá estudiar el límite de ambos gateways.



Figura 27. Despliegue con dos gateways dentro del campus de Vera.

Con estos tres despliegues se pretende obtener el comportamiento de la red obteniendo los valores de la Tabla 5.

Medidas a realizar
Consumos de batería
Pruebas de cobertura
SNR (dB)
RSSI (dB)
Tasa de éxito (%)
Tasa de pérdidas (%)

Tabla 5. Medidas a realizar en el despliegue.

Con estas mediciones se podría realizar un mapa de cobertura de la tecnología LoRaWAN y ver la eficiencia y productividad de la tecnología.

Por último, en la última prueba con dos gateways en el escenario sería posible estudiar los límites de alcance de los gateways y ver cómo actúa el servidor en caso de recibir dos mensajes procedentes del mismo dispositivo final.

Por último, también existe un escenario adicional mediante el cual se puede estudiar el alcance de la tecnología en un entorno outdoor a una mayor distancia, como se muestra en la Figura 28. Mediante esta prueba se puede simular un escenario en el que sea necesario la conexión con varias naves industriales, por ejemplo, con las naves de los proveedores.



Figura 28. Despliegue en la zona costera.

Por motivos de la crisis sanitaria del SARS-CoV-2 esta línea de investigación se tuvo que abandonar a causa del confinamiento y siendo imposible llevar a cabo el despliegue en el marco de tiempo establecido. Es por ello por lo que todas las tareas realizadas se han quedado como tareas previas del trabajo que se ha realizado.

De esta línea de investigación se hablará posteriormente en el apartado de Trabajos futuros.

Capítulo 5. Desarrollo del trabajo

Una vez realizado el estudio de un posible despliegue real se han realizado las simulaciones oportunas con un simulador que soporte la tecnología LoRaWAN, y en especial la clase B. Se estuvieron estudiando varios simuladores.

En primer lugar, se estudió el simulador arm MBED [24] que tiene la opción de simulación offline. Este simulador se tuvo que abandonar ya que la versión disponible estaba desactualizada y ya no existía un soporte disponible.

En segundo lugar, se ha estudiado el simulador ns-3 [28]. Este simulador surgió en el año 2005 y utiliza un lenguaje de programación C++. La infraestructura del simulador ns-3 permite desarrollar modelos de simulación de redes IP, no IP, redes inalámbricas ... Es por ello por lo que se escogió este simulador al soportar la tecnología LoRaWAN, y en especial la clase B.

5.1 Escenario

Primero, se ha definido un escenario para realizar las simulaciones. En este trabajo se ha optado por desarrollar la tecnología en un entorno industrial.

En un escenario industrial es muy importante tener en cuenta las simulaciones ya que a la hora de realizar el despliegue debe estar todo medido y controlado para que funcione correctamente. El despliegue de la red requiere un gran número de recursos como tiempo, dinero, personal y es por ello que hay que evitar cualquier fallo.

En este trabajo el escenario industrial definido es una planta industrial de dimensiones 2000m x 500m con una altura de 10m. El interior de la planta se ha dividido en 4 grandes superficies de 500m x 500m.

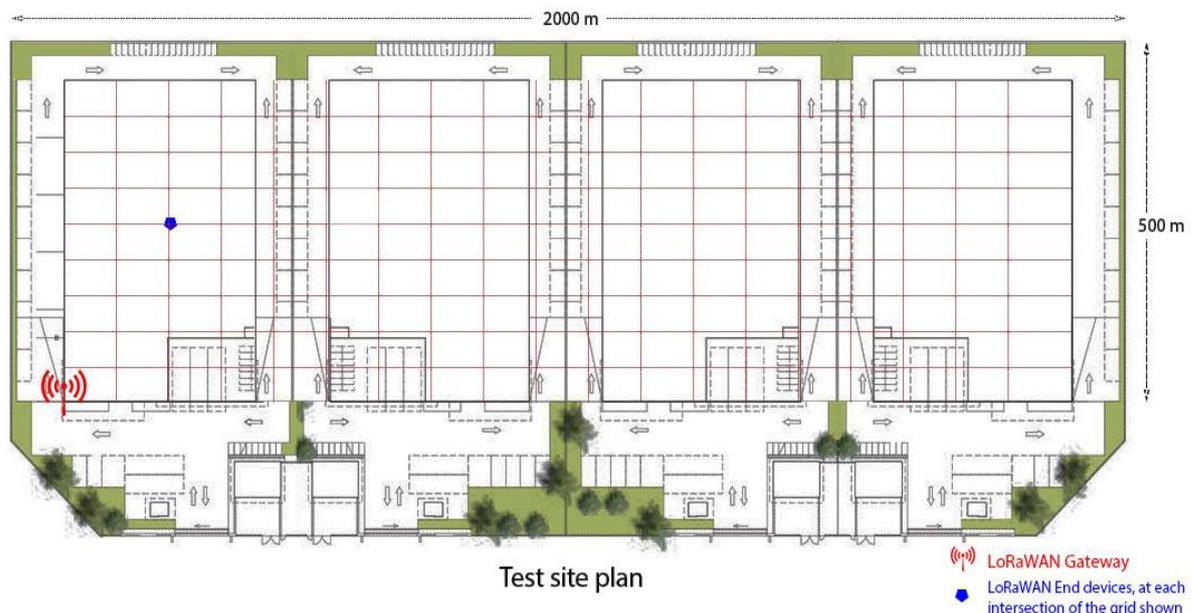


Figura 29. Disposición de los dispositivos dentro de la planta industrial.

Una vez definido el escenario donde realizar las simulaciones se ha definido el número de nodos, en este caso 200. Los nodos, dentro de la planta, se han distribuido en cuadrículas uniformes de 100m x 54m, como muestra la Figura 29. Cada nodo se encuentra en la intersección entre

cuadrículas. En este trabajo los nodos, en todo momento, se encuentran en una posición fija suponiendo que actúan como sensores.

Por otro lado, se ha trabajado con un gateway ubicado en la esquina inferior izquierda a una altura de 2 metros. De esta forma se logra una mayor distancia con el nodo más alejado y por lo tanto nos permite observar mejor el impacto del mecanismo ADR para el cambio de SF.

A continuación, se ha realizado la elección más apropiada del tamaño de los paquetes. El tamaño de payload elegido es de 21 bytes, de los cuales 13 bytes pertenecen al protocolo de LoRaWAN y los 8 bytes restantes de datos. De esta forma se obtiene una mayor recepción de datos en caso de éxito en la entrega. La longitud del preámbulo es de 8 símbolos por defecto como se indica en el estándar. Hay que tener en cuenta que dependiendo del SF el número final de símbolos varía.

Una vez se tiene el tamaño de los paquetes se procede al cálculo del tiempo en el aire de los mensajes mediante las siguientes ecuaciones [29]. Para ello en primer lugar se define el tiempo de símbolo mediante la Ecuación (4).

$$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (4)$$

Este es el tiempo que se tarda en enviar chips a la velocidad de chip. Por otro lado, otro tiempo a tener en cuenta es el tiempo de preámbulo mediante la Ecuación (5), donde $n_{preamble}$ es el número de símbolos en el preámbulo.

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4.25) \times T_{sym} \quad (5)$$

También hay que considerar el número de símbolos que forman parte del encabezado y la carga útil del paquete, el cual se calcula con la Ecuación (6).

$$payloadSymbNb = 8 + (\max(\text{ceil}(\frac{8PL-4SF+28+16-20H}{4(SF-2DE)}), 0)) (CR + 4), 0 \quad (6)$$

A continuación, se calcula el tiempo de carga útil mediante la Ecuación (7).

$$T_{payload} = payloadSymbNb \times T_{sym} \quad (7)$$

Por último, se procede al cálculo del tiempo en el aire mediante la Ecuación (8).

$$Air\ Time = T_{preamble} + T_{payload} \quad (8)$$

Las abreviaciones usadas en las fórmulas son las siguientes:

- SF: Factor de propagación.
- PL: Número de bytes de la carga útil.
- H: Inserción del encabezado opcional en el frame.
- DE: Uso de la tasa optimizada.
- CR: Tasa de código.

Mediante las ecuaciones (4), (5), (6), (7) y (8) se procede al cálculo del tiempo en el aire para el mejor y para el peor de los casos. Para el mejor de los casos, con un SF=7, el tiempo en el aire es de 56,58ms lo que el Duty Cycle permite enviar un mensaje cada 6 segundos. En el peor de los casos, con un SF=12, el tiempo en aire es de 1482,75ms lo que el Duty Cycle permite enviar un mensaje cada 2 minutos y 28 segundos. Por eso se ha escogido enviar un mensaje cada 5 minutos y de esta forma garantizar que independientemente del SF en el que se encuentre se respete el Duty Cycle.

Una vez escogidos los datos anteriores se procede a seleccionar los siguientes parámetros para las simulaciones:

PARAMETROS	VALOR
Datos	8 bytes
Protocolo LoRaWAN	13 bytes
Longitud total de la carga útil	21 bytes (13 bytes + 8 bytes)
Longitud de preámbulo	8 símbolos (predeterminado por frame)
Factor de propagación máximo	SF 12
Factor de propagación mínimo	SF 7
Tasa de código	4/5
Ancho de banda	125 kHz
Tasa de Upload	5 minutos
Duty Cycle	0,5%
Tasa Download (clase B)	2,5 horas
Potencia de transmisión	14dB
Número total de nodos	200
Número total de gateways	1
Área	2000m x 500m x 10m
Tiempo de simulación	11,11 horas
LoRaWAN clase de los dispositivos	Clase B

Tabla 6. Parámetros configurados en la simulación.

Una vez definidos los parámetros de la Tabla 6, se procede a definir el modelo de canal. Un aspecto importante a tener en cuenta para las simulaciones en un entorno industrial es diseñar el modelo de canal e interferencias, y así simular un entorno lo más real posible. El modelo de canal seleccionado es el 'HybridBuildingsPropagationLossModel' [30], el cual se encuentra disponible para el simulador ns-3. Este modelo de canal integra varios modelos de pérdidas, como el modelo Okumura-Hata, COST231 o ITU-R P.1238. Este último modelo sirve para comunicaciones interiores, de esta forma el canal se puede adaptar a escenarios interiores y exteriores. El modelo 'HybridBuildingsPropagationLossModel' trabaja junto con el modelo 'Building'.

Con estos dos modelos se ha diseñado el modelo de canal; se han seleccionado una serie de parámetros necesarios como se muestran en la Tabla 7.

PARAMETROS	VALOR
Modelo de canal	HybridBuildingsPropagationLossModel
Modelo de edificio	Building
Área	2000m x 500m x 10m
Divisiones en X	4
Número de plantas	1
Tipo de edificio	Office
Tipo de pared	Concrete with windows
Tipo de ambiente	Urban
Banda del canal	868 MHz
Nivel de la azotea	10m

Tabla 7. Parámetros definidos para el modelo de canal.

El modelo 'HybridBuildingsPropagationLossModel' nos permite implementar un modelo de pérdidas por propagación en espacios interiores. En él, la fórmula para las pérdidas es la siguiente:

$$L_{total} = 20 \log f + N \log d + L_f(n) - 28dB \quad (9)$$

En este caso, al seleccionar el tipo oficina en el modelo de edificio, el coeficiente de pérdida de potencia N es 30dB y:

$$L_f = 15 + 4(n - 1) \quad (10)$$

Donde n es el número de plantas, f la frecuencia (MHz) y d la distancia (m).

Dicha configuración se ha aplicado en el simulador para analizar el rendimiento de la red en un entorno lo más real posible.

5.2 Implementación del mecanismo ADR

Una vez realizada la configuración del modelo de edificio, modelo de canal y selección de los parámetros oportunos se procede a la implementación del mecanismo ADR para el simulador ns-3.

En primer lugar, es necesario la instalación del simulador ns-3 [28]. En este trabajo se ha realizado la instalación en una máquina virtual con el sistema Ubuntu.

Después de la instalación del simulador se procede a la descarga de la carpeta LoRaWAN de código libre [31].

Mediante esta implementación de LoRaWAN para clase B se incluye:

- El servidor de red: permite la generación y envío de balizas para la sincronización, cálculo de las ranuras de ping para los dispositivos de clase B y el envío de datos en el enlace descendiente (en el caso de haber) siempre respetando el ciclo de trabajo.
- Los dispositivos finales: permite despertar el nodo y la recepción de las balizas en caso de estar en clase B y el uso de la marca de tiempo para calcular las propias ranuras de ping.

Esta implementación de LoRaWAN está bastante completa, pero presenta varias carencias, entre ellas el mecanismo de ADR. Este mecanismo es muy importante a la hora de realizar las simulaciones ya que es una gran mejora a la hora del envío y recepción de mensajes y el ahorro de energía. Por lo tanto, en este trabajo se ha realizado la implementación de dicho mecanismo y de esta forma obtener unos resultados más realistas y mejorados.

Para la implementación del mecanismo se han realizado los siguientes pasos:

- En primer lugar, hay que obtener la proporción de Señal a Ruido, SNR. Se va almacenando dicho valor en un vector para cada nodo.
- Mediante un contador de 20 paquetes recibidos, vamos almacenando el valor de SNR en el vector.
- Una vez llegamos a 20 en el contador se procede al cálculo del nuevo SF implementando las ecuaciones (2) y (3) con el valor de SNR máximo.
- Una vez calculado el nuevo SF se debe notificar al nodo el nuevo SF.
- A partir de este instante vamos actualizando el valor de SNR más antiguo por el nuevo valor de SNR máximo, implementando de esta forma una ventana deslizante.
- Una vez se obtiene el nuevo valor de SNR se procede otra vez al cálculo del nuevo SF y se notifica al nodo.
- En otra línea paralela, en caso de detectar 20 paquetes seguidos perdidos procedentes del gateway se baja en uno el SF del nodo.
- En esta implementación del ADR se ha simplificado la parte de incrementación de la potencia de transmisión.

Podemos observar dicho mecanismo en el siguiente diagrama:

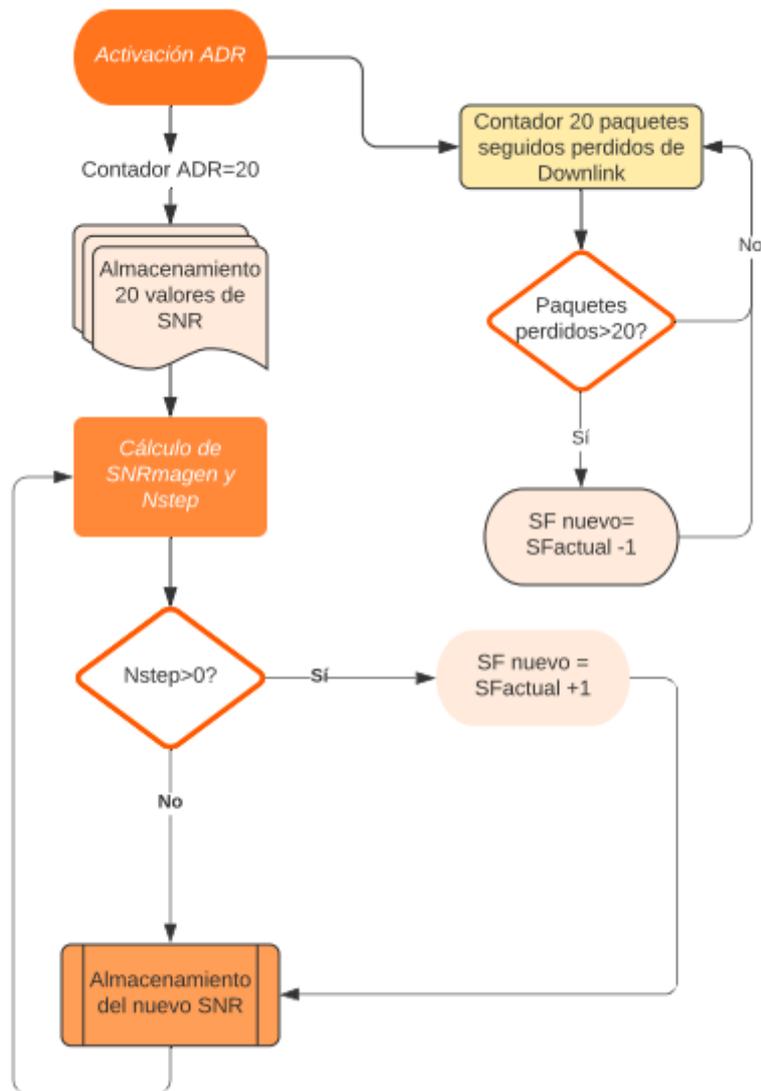


Figura 30. Diagrama del mecanismo de ADR.

En la siguiente figura se puede observar parte de la implementación del mecanismo. En ella se puede observar cómo almacenamos el máximo valor de SNR del nodo. A continuación, actualizamos el contador de paquetes y calculamos los parámetros de SNRmargen y Nstep. Una vez calculado el valor de Nstep se incrementa o no el valor de SF del nodo.

```
//ADR
if(contNodoID==1){
    prol=snrADR;
}else{
    if(snrADR>snrProNodoId){
        prol=snrADR;
    }else{
        prol=snrProNodoId;}
}

if(ADRb==0){
    if (contNodoID < 20){
        contNodoID=contNodoID+1;
    }
    else {
        double SNRmargen= prol-requiredSNR-10;
        double Nstep= round(SNRmargen/3);
        if(Nstep>0){
            if(DRNodo<5){
                DRNodo=DRNodo+1;}
        }
        contNodoID=1;
        snrProNodoId=0;
        ADRb=1;
    }
}else{
    double SNRmargen= prol-requiredSNR-10;
    double Nstep= round(SNRmargen/3);
    if(Nstep>0){
        if(DRNodo<5){
            DRNodo=DRNodo+1;}
    }
    if (contNodoID < 20){
        contNodoID=contNodoID+1;
    }else{
        contNodoID=1;
    }
}

return prol;
}
```

Figura 31. Parte principal de la implementación del mecanismo de ADR.

Mediante la implementación del ADR podemos obtener una mejora de los resultados como se observará en el capítulo siguiente.

Capítulo 6. Simulaciones y resultados

En este apartado se han realizado distintas simulaciones en clase B para realizar un análisis de los resultados con mayor profundidad. Es por ello por lo que se han realizado las siguientes simulaciones de la red:

- Sin el mecanismo de ADR para clase B.
- Con la implementación del mecanismo ADR para mensajes de subida.
- Con la implementación del mecanismo ADR modificando el contador para mensajes de subida.
- Con la implementación del mecanismo ADR modificando el cambio de SF para mensajes de subida.
- Con la implementación del mecanismo ADR para mensajes de bajada clase B.

6.1 Simulaciones sin el mecanismo ADR para clase B

En primer lugar, se realizan las simulaciones en el escenario definido, pero sin el mecanismo de ADR, para los nodos de clase B. Los resultados se muestran en la Figura 32.

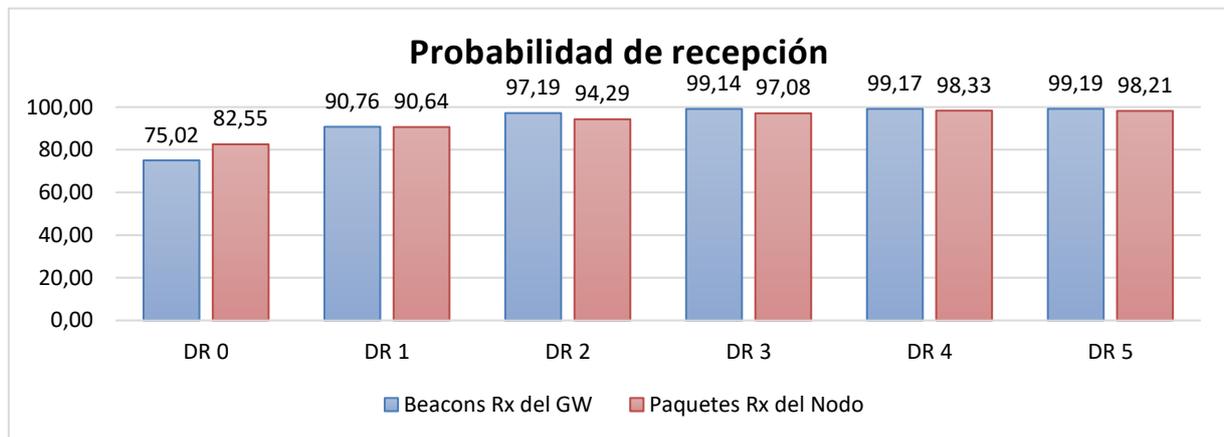


Figura 32. Probabilidades de recepción sin el mecanismo ADR.

En la Figura 32 se puede observar el comportamiento de la red en los distintos DR disponibles. La equivalencia entre Data Rate (DR) y Spreading Factor (SF) es la siguiente:

DR	SF
0	12
1	11
2	10
3	9
4	8
5	7

Tabla 8. Equivalencia entre Data Rate y Spreading Factor.

Mediante la relación de la tabla anterior podemos observar que para un DR=0, que equivale a un SF=12, el porcentaje de mensajes recibidos por el nodo es más bajo ya que los mensajes permanecen un mayor tiempo en el aire y existe una mayor probabilidad de colisión. Este SF es el más apropiado para los nodos que se encuentren más alejados porque les ofrece una mayor robustez, pero para el resto de los nodos es una desventaja. Podemos observar que conforme se va aumentando el DR, la probabilidad de recepción tanto de los mensajes ascendientes como los descendientes de clase B es mayor.

A partir de un DR=4 y DR=5, las probabilidades son casi del 100%. En estos casos el tiempo en el aire es mucho menor y por lo tanto menor probabilidad de colisión. En el escenario, al estar dentro de un área con distancias cortas, sabiendo que la tecnología LoRaWAN puede llegar a los 15 kilómetros, las probabilidades son bastante altas.

Estos resultados son de gran interés para así poder comparar posteriormente el comportamiento de la red con la implementación del mecanismo de ADR.

6.2 Simulaciones con la implementación del mecanismo ADR para mensajes de subida

Una vez implementado el mecanismo ADR, lo primero que se ha simulado son los mensajes de subida.

Para ello, en primer lugar se debe modificar el código para que los nodos cambien de SF cada vez que el mecanismo lo indique.

Una vez realizadas las modificaciones oportunas en el código se procede a la simulación.

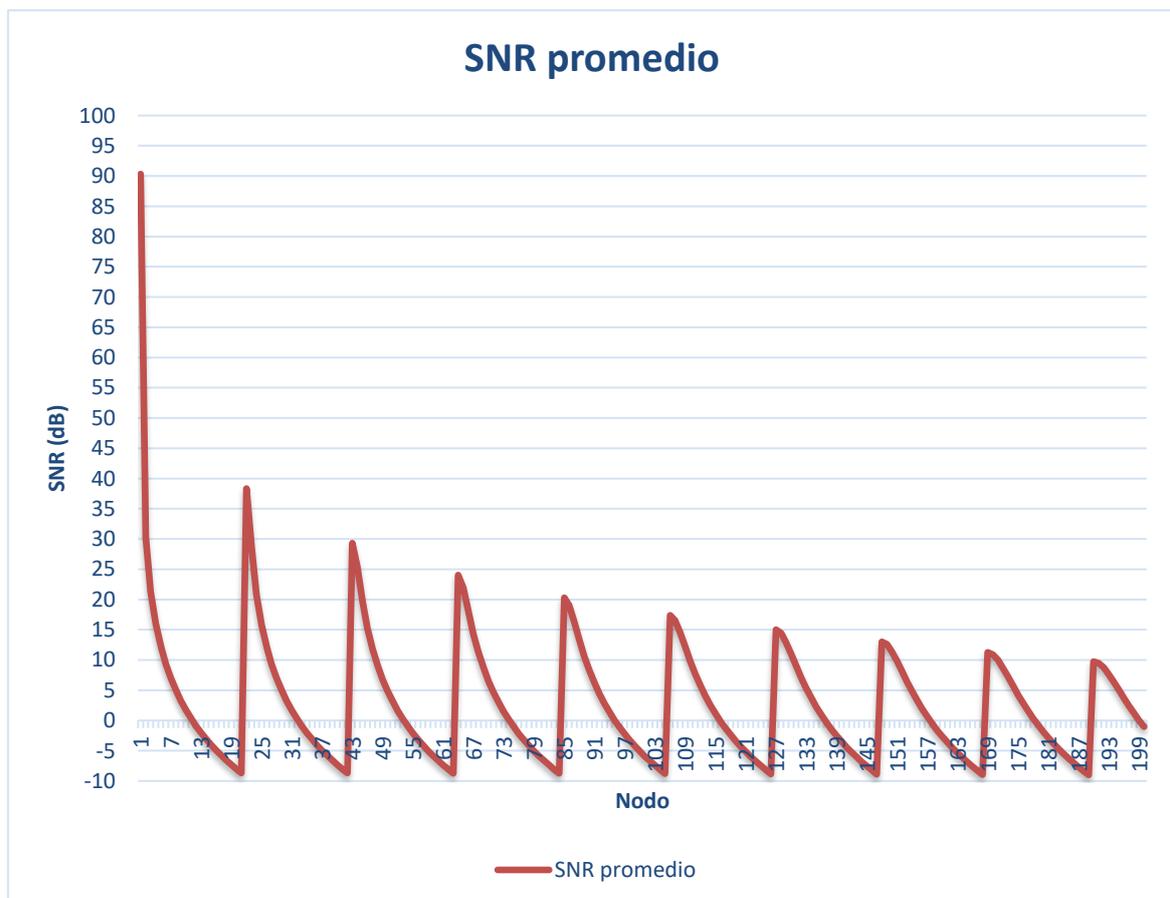


Figura 33. SNR promedio de los 200 nodos.

En primer lugar, en la Figura 33, se muestra una gráfica donde se pueden observar los valores promedios de SNR. En el caso del nodo 1 al encontrarse junto con el gateway el valor de SNR es de 90,33 dB. En el resto de los nodos podemos observar como el valor de SNR varía según la distancia a la que se encuentra el nodo. Por ejemplo, los nodos 20, 41..., ubicados en el eje $x=2000m$, muestran los mínimos valores de SNR. Por otro lado, los nodos más cercanos al gateway ubicados en el eje $x=0$ muestran los máximos valores de SNR.

Viendo los valores de SNR se puede predecir los nodos que van a alcanzar un valor de SF más bajo y cuáles van a estar en un SF más alto.

A continuación, se pueden observar los cambios de SF por parte del nodo mediante el mecanismo de ADR.

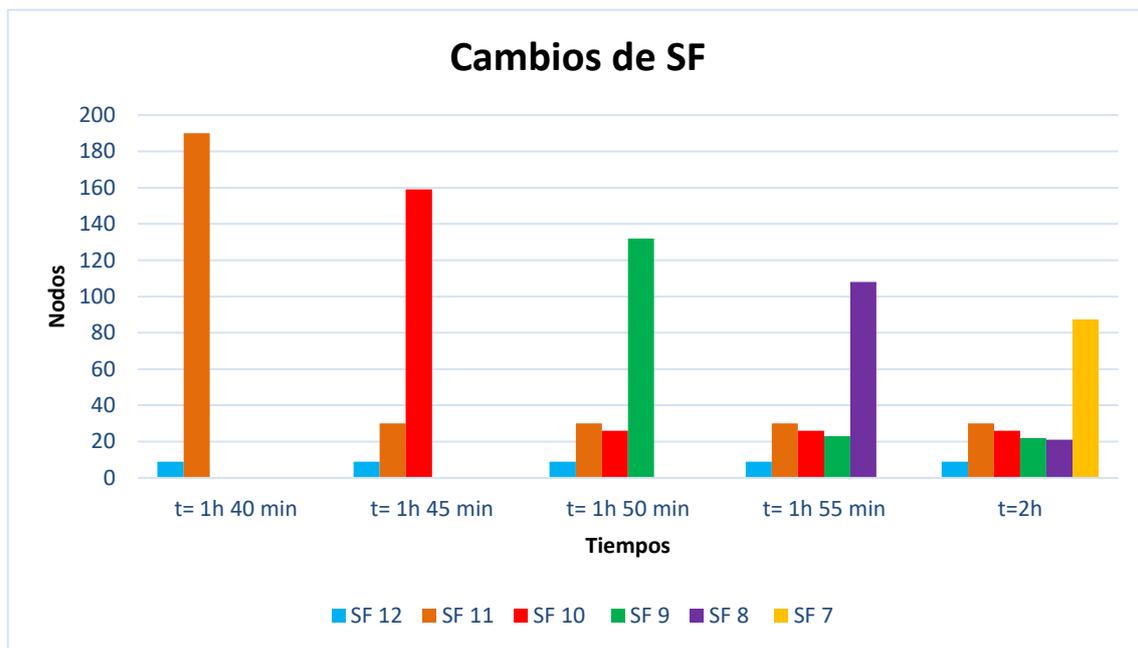


Figura 34. Cambios de SF para cada instante temporal.

En la Figura 34 se puede observar la evolución del SF en los nodos. Para ello se puede observar que el primer tiempo en el que el ADR procede al cálculo del nuevo SF es en $t=1h\ 40min$, ya que el ADR en primer lugar necesita almacenar 20 valores de SNR de 20 paquetes de subida que se envían cada 5 minutos. En este tiempo se puede observar como la mayoría de los nodos cambian de SF, a excepción de los que se encuentran en el extremo más alejado.

El siguiente tiempo, al almacenar el nuevo valor de SNR mediante una ventana deslizante, se procede al nuevo cálculo de SF en $t=1h\ 45min$. En este tiempo se puede observar como un mayor número de nodos mantienen el SF.

Cuando se llega a $t= 2h$, los nodos más cercanos llegan a $SF=7$, ya que al iniciar las simulaciones con un $SF=12$ son necesarios 5 cambios de SF para llegar al más bajo. En este tiempo se puede observar cómo solo la mitad de los nodos llegan a alcanzar un $SF=7$.

Esta evolución de SF se puede observar en más detalle en la Figura 35, donde comparamos el nodo más alejado con el más cercano al gateway.

Se puede observar como el nodo más alejado no cambia nunca de SF y como el nodo más cercano disminuye el valor de SF en cada marca temporal hasta llegar al mínimo SF.

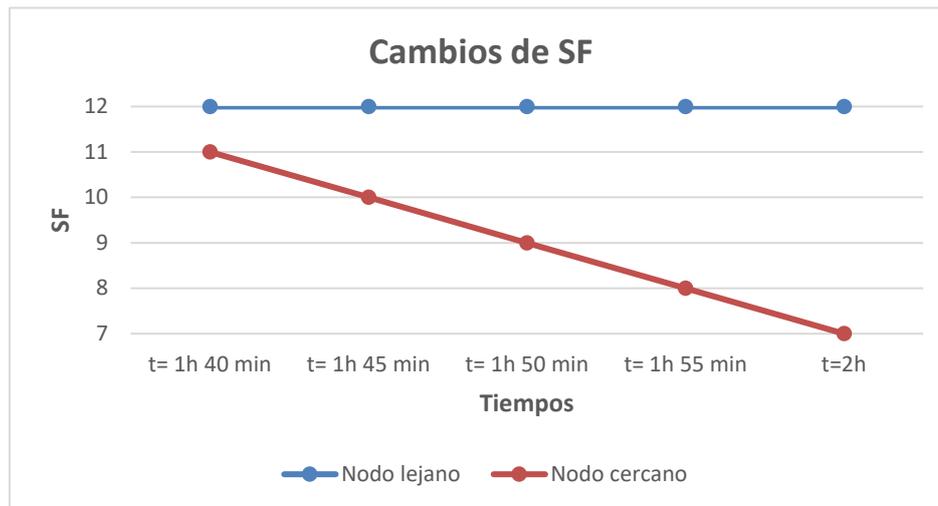


Figura 35. Comparación entre el nodo más lejano y el más cercano.

A continuación, se pueden observar los mapas de calor del cambio de SF para cada tiempo en el que el ADR procede a realizar un cambio de SF.

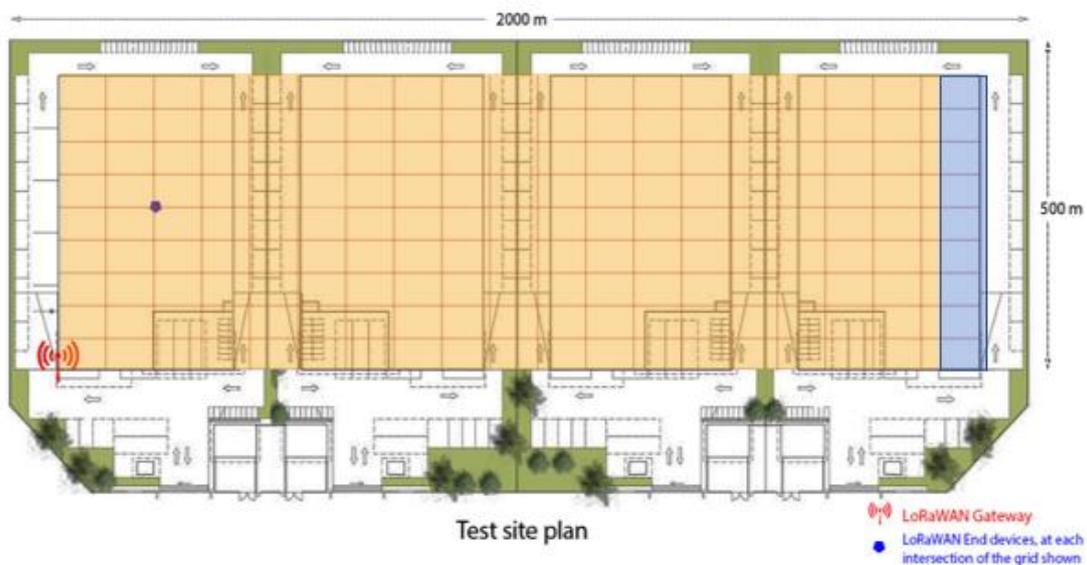


Figura 36. Mapa de calor en el instante de tiempo t = 1 hora y 40 minutos.

En la Figura 36 se pueden observar en azul los nodos que se mantienen en SF=12 y en naranja aquellos que cambian de SF=12 a SF=11 en el instante de tiempo t=1hora y 40 minutos.

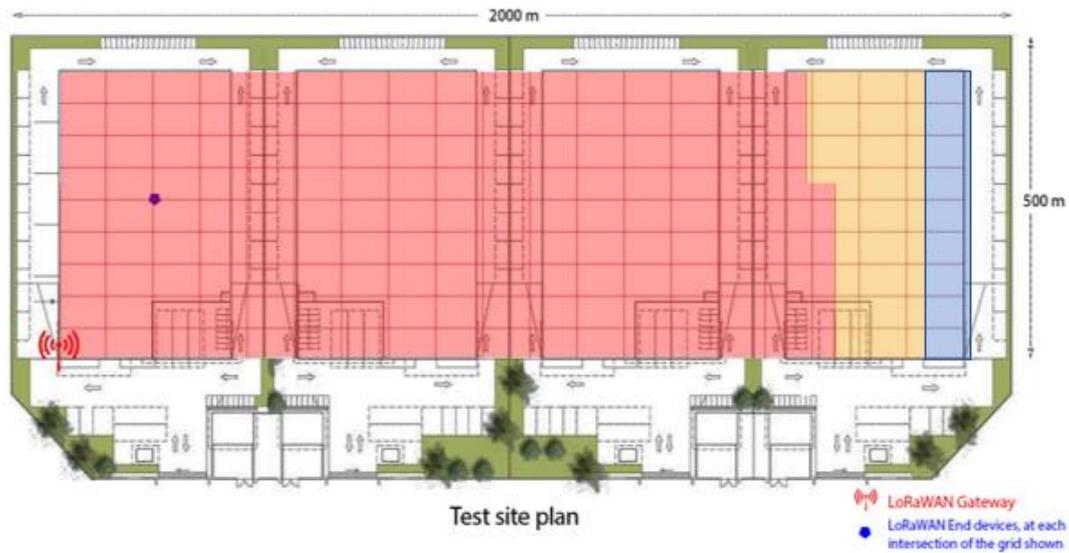


Figura 37. Mapa de calor en el instante de tiempo $t = 1$ hora y 45 minutos.

En la Figura 37 se puede ver la evolución del SF en el instante de tiempo $t=1$ hora y 45 minutos. En este instante se puede observar cómo casi un cuarto de los nodos permanece en SF=12 y SF=11, azul y naranja, y el resto de los nodos cambia de SF=11 a SF=10, en rojo.

En la Figura 38 se muestra la evolución del SF en el instante de tiempo $t=1$ hora y 50 minutos. En este instante tres cuartos de los nodos realizan el cambio de SF=10 a SF=9, los nodos en el área verde de la figura. El resto de los nodos por su lejanía no realizan cambio de SF.



Figura 38. Mapa de calor en el instante de tiempo $t = 1$ hora y 50 minutos.

En la Figura 39 se muestra la evolución de SF en el instante de tiempo $t=1$ hora y 55 minutos, donde casi dos tercios de los nodos realizan el cambio de SF de 9 a 8, los nodos dentro del área morada de la figura.

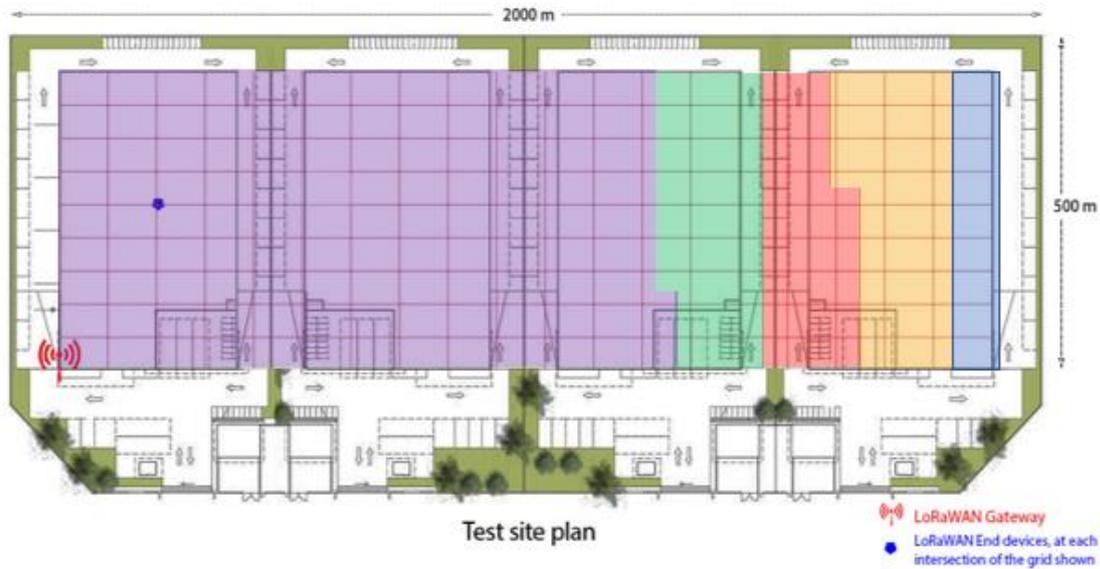


Figura 39. Mapa de calor en el instante de tiempo $t = 1$ hora y 55 minutos.

Por último, en la Figura 40, se muestra el mapa de calor para el instante de tiempo $t=2$ horas. Donde los nodos más cercanos, la mitad de los nodos, realizan el cambio de SF de 8 a 7, en amarillo. Estos nodos han llegado al mejor SF en un tiempo de 2 horas.

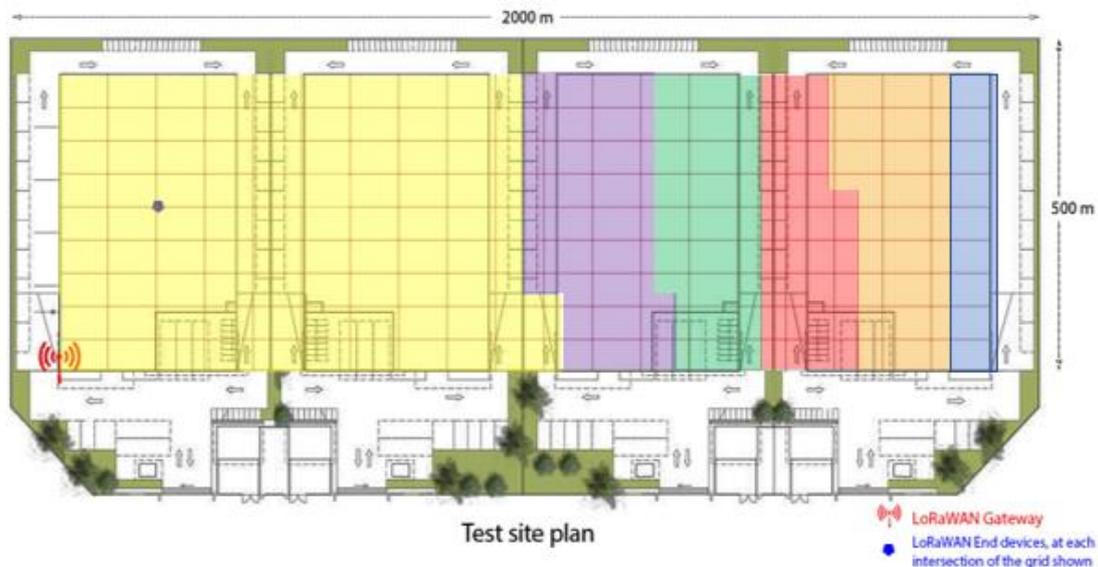


Figura 40. Mapa de calor en el instante de tiempo $t = 2$ horas.

El tiempo de convergencia al mejor SF depende del tiempo en el que se envían mensajes al gateway. En este escenario en el que el nodo envía un mensaje al gateway cada 5 minutos el tiempo de convergencia es de 2 horas. Pero si el nodo tarda un mayor tiempo en enviar un mensaje al gateway sería conveniente modificar el número de mensajes del contados del ADR para acortar este tiempo y que cambie antes de SF.

Por ejemplo, si el nodo envía un mensaje cada hora, siguiendo las especificaciones de la norma, el primer cambio de SF se realizaría a las 20 horas de activación. Este tiempo es demasiado elevado para aplicaciones industriales, ya que estamos desperdiciando recursos de red. Posteriormente se hablará más en detalle sobre este problema.

Una vez obtenidos los primeros resultados del impacto del ADR, se puede comparar con el escenario sin ADR para ver si realmente existe una mejora o no.

En este caso se comparan los mensajes de subida del nodo para realizar la comparativa.

Promedio paquetes enviados	Promedio paquetes RX sin ADR	% paquetes RX sin ADR
133,32	110,05	82,55

Tabla 9. Valores de la simulación sin mecanismo de ADR.

Promedio paquetes enviados	Promedio paquetes RX con ADR	% paquetes RX con ADR
133,32	121,19	91,80

Tabla 10. Valores de la simulación con el mecanismo de ADR.

En la Tabla 9 y 10 se puede observar el promedio de los mensajes enviados por el nodo y los mensajes recibidos por el gateway con y sin ADR.

En los resultados se ha visto que para un SF=7 para los nodos más lejanos ofrece unas pérdidas superiores al 20%, lo que supone unas pérdidas demasiado elevadas. Por ello, se ha escogido comparar con un SF=12 ya que permite asegurar que todos los nodos tienen una conexión decente a esas distancias.

Se puede observar una mejora importante ya que en el caso de no activar el ADR y estar trabajando con un SF=12, el porcentaje de mensajes recibidos es del 82,55%. Por otro lado, en el caso de tener el mecanismo de ADR activado, el porcentaje de mensajes recibidos por el gateway es del 91,80%, casi un 10% más que en el caso de no tener el ADR activado.

Esto demuestra claramente que el mecanismo ADR ofrece una mejora en la red, a parte del ahorro de recursos. En aplicaciones industriales la diferencia del 10% existente entre tener o no el mecanismo de ADR activado es muy importante, ya que, si se trabaja con datos sensibles, la pérdida de paquetes puede producir un impacto en la cadena de producción.

Otro aspecto a tener en cuenta en el mecanismo de ADR es el ahorro de energía de los dispositivos, ya que dependiendo del SF que se emplea, la energía consumida es mayor o menor. El consumo de energía debido a la transmisión de paquetes se calcula mediante la ecuación:

$$E_{tx_consum} = \sum_{SF_i=7}^{SF_i=12} I_{tx} * V * T_{airtime_SF_i} * T_{in_SF_i} / T_{tx} \quad (11)$$

En la Figura 41 se puede observar la energía consumida en Julios para el tiempo de simulación de 11,11 horas, una tasa de mensajes de subida de 5 minutos y un contador de 20 paquetes. Se puede observar claramente como dependiendo del SF el consumo de energía puede variar mucho. Estos consumos son muy importantes a tener en cuenta ya que, si el dispositivo no está conectado a la corriente, la vida puede variar llegando a tener una vida útil de varios años, dependiendo de la tasa de mensajes que transmitimos. Hay que tener en cuenta que los consumos no tienen en cuenta el consumo de radio.

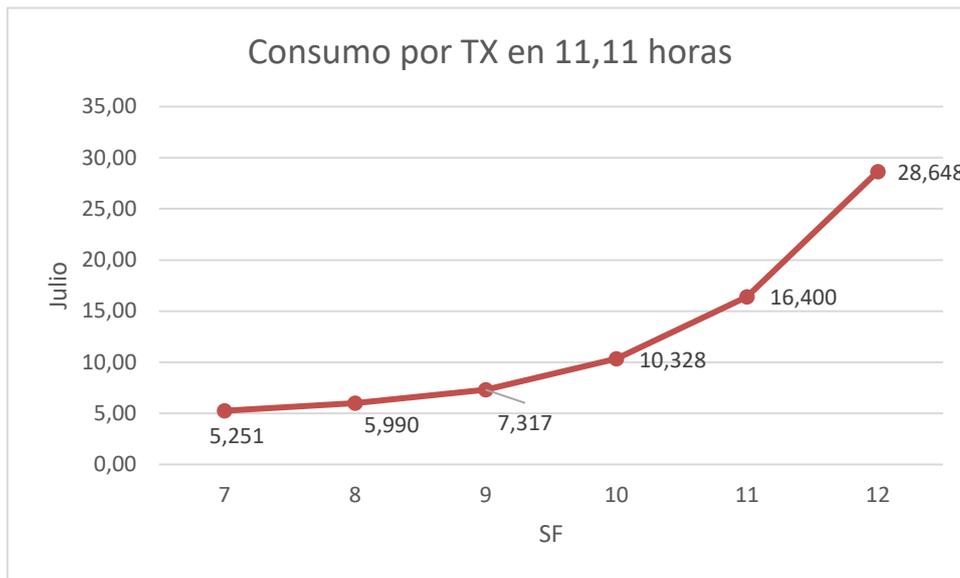


Figura 41. Consumo en la transmisión para 11,11 horas.

El mecanismo de ADR tiene una gran influencia, ya que los dispositivos que alcancen un SF=7 tendrán un mayor ahorro de energía, como se muestra en la Figura 41, ya que el consumo total al final de la simulación es de tan solo 5,251J.

Por otro lado, aquellos dispositivos que no logren disminuir su SF y permanecen en todo momento en un SF=12, el consumo total de energía será de 28,648J.

Estos datos nos permiten observar que claramente el mecanismo de ADR implementado nos ofrece un ahorro de energía importante, siendo una gran ventaja a la hora de realizar un despliegue.

6.3 Simulaciones con la implementación del mecanismo ADR modificando el contador para mensajes de subida

En este apartado se va a proceder a la modificación del mecanismo de ADR establecido por el estándar, y de esta forma acortar los tiempos de convergencia del SF en el caso de que los dispositivos finales envíen mensajes de subida en un tiempo mayor al establecido inicialmente de 5 minutos.

En este apartado se han modificado varios parámetros los cuales se pueden observar en la Tabla 11.

PARAMETROS	VALOR
Tasa Upload	30 minutos
Contador SNR	10 y 5 paquetes

Tabla 11. Parámetros modificados en la configuración del simulador y del mecanismo de ADR.

- En primer lugar, se va a realiza la simulación para una Tasa de Upload = 30 min. En esta primera prueba no vamos a modificar el contador de paquetes para ver cuál sería el comportamiento normal con el mecanismo de ADR sin modificar, como lo establece la norma.

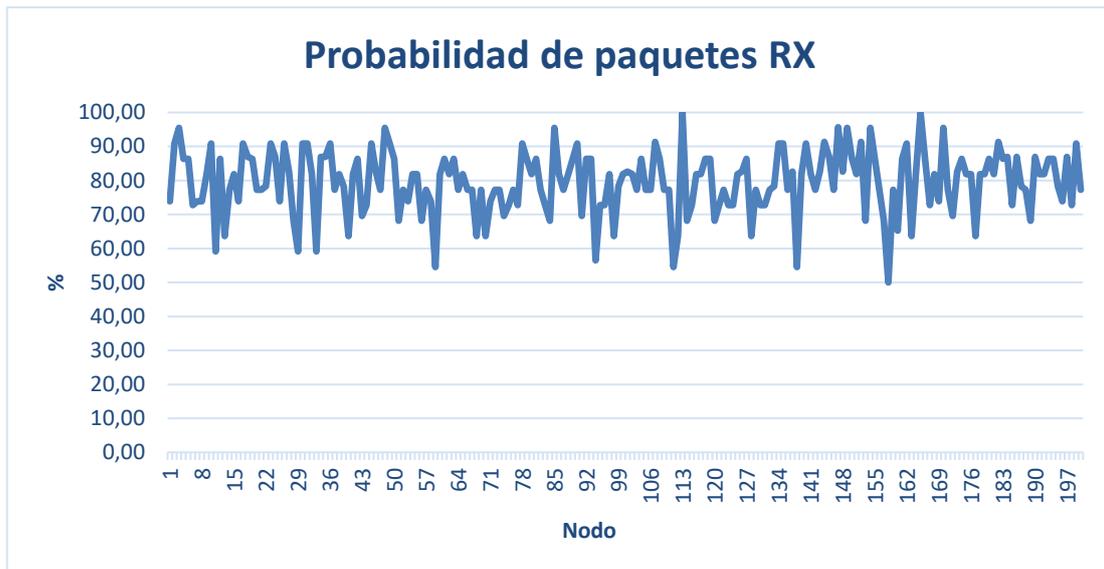


Figura 42. Probabilidad de recepción en los paquetes de subida sin modificaciones en el ADR.

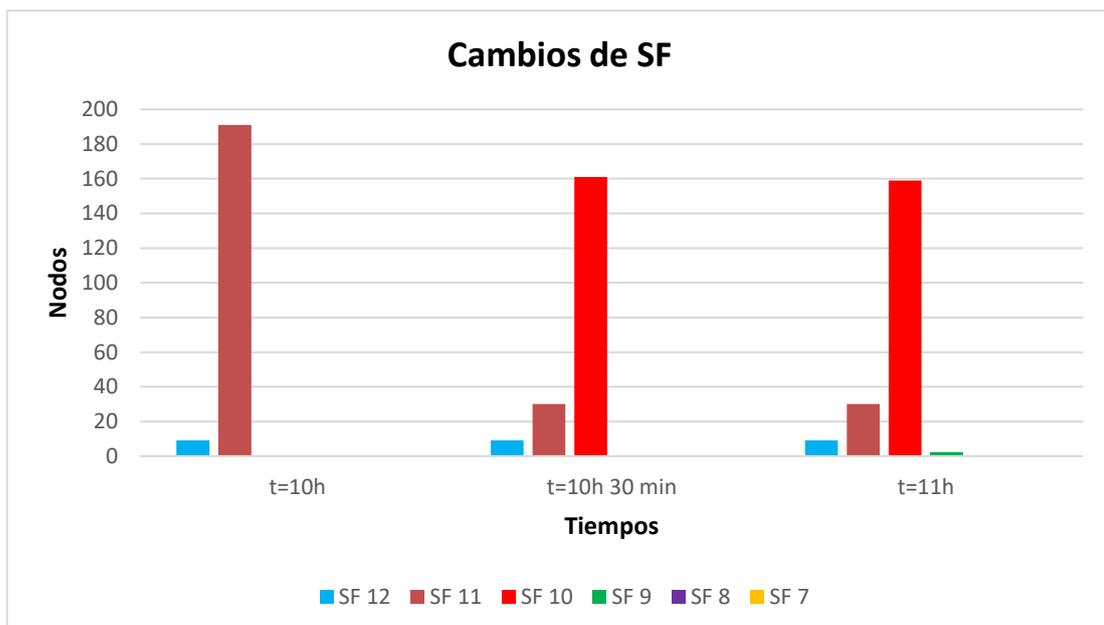


Figura 43. Cambios de SF sin modificaciones en el ADR.

En la Figura 42 se puede observar la probabilidad de éxito en la recepción de paquetes de subida. Como se puede observar el promedio de las probabilidades es del 79,57%, un valor lejano a lo esperado.

En el cambio de SF, como se observa en la Figura 43, al enviar un paquete cada 30 minutos y tener que esperar 20 paquetes para que se produzca el primer cambio de SF, el primer cambio de SF se realizará sobre las 10 horas desde la activación del mecanismo.

A las 10 horas y media los nodos pueden efectuar el nuevo cambio de SF. Como la simulación dura 11 horas, solo unos pocos nodos, dos para ser más exactos, realizan el cambio a SF = 9.

- A continuación, vamos a realizar la misma simulación que en el caso anterior, pero para un contador de 10 paquetes, lo que va a permitir efectuar una convergencia del SF más rápida.

En la Figura 44, se puede observar como en el caso de tener un contador de 10, en lugar de 20, las probabilidades de éxito en la recepción de paquetes de subida son mayores, ya que el promedio total de las probabilidades en este caso es del 83,76%.

Este aumento de la probabilidad de 4 puntos puede parecer poco pero, para las aplicaciones industriales, la mínima mejora es importante para prevenir cualquier fallo.

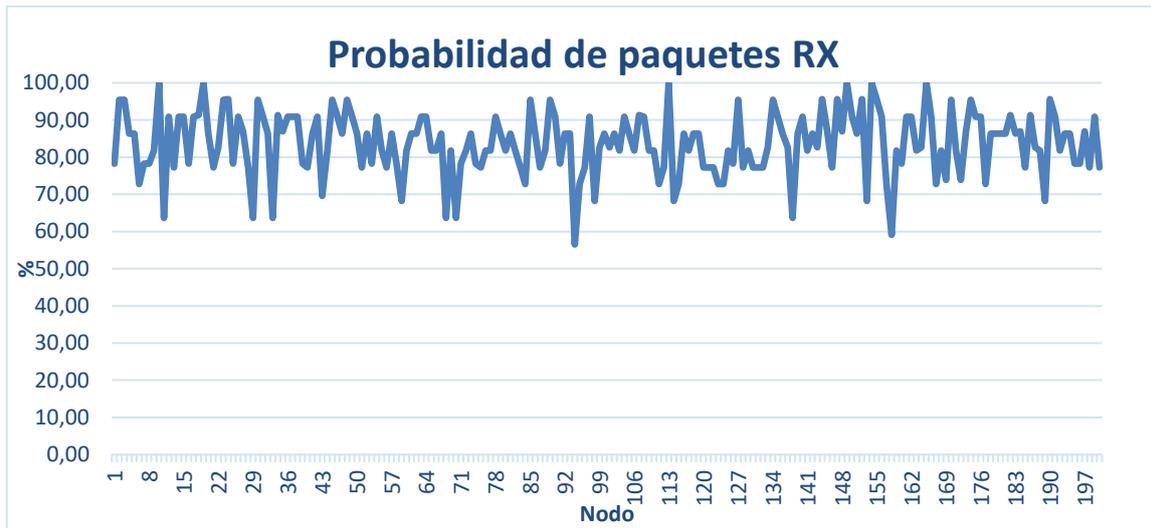


Figura 44. Probabilidad de recepción en los paquetes de subida con un contador de 10 paquetes.

En este caso si nos fijamos en los cambios de SF, se puede observar cómo da tiempo suficiente a que los nodos cercanos lleguen a un SF=7 y mejore la comunicación con el gateway.

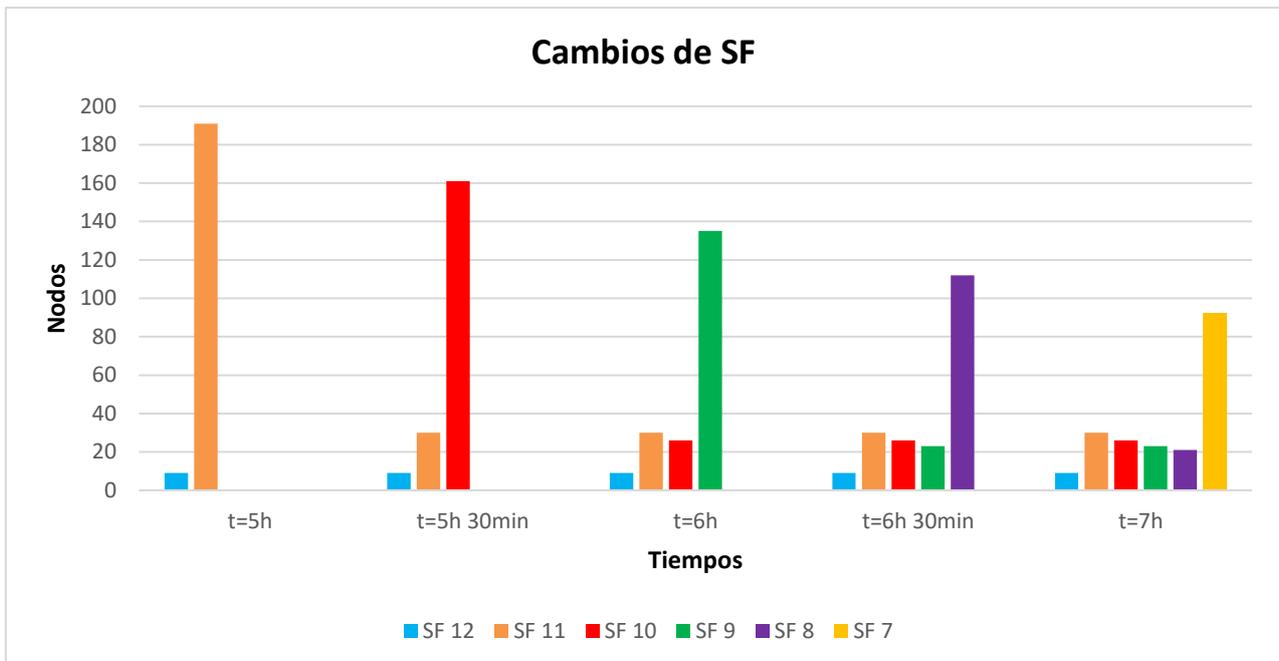


Figura 45. Cambios de SF para un contador de 10 paquetes.

En la Figura 45 se observa como en el instante de tiempo $t=5$ horas se empiezan a producir los primeros cambios de SF. En $t=7$ horas se puede observar como el mecanismo ya permite cambiar a $SF=7$ a los nodos más cercanos, de esta forma obtenemos una mejor comunicación con el gateway. El hecho de llegar a un $SF=7$ es importante como se ha podido observar en la probabilidad de éxito en la recepción de mensajes de subida.

- Por último, se va a realizar la simulación, pero con un contador de 5 paquetes de subida. Este caso permite converger el SF de los nodos más rápido, ya que en el caso anterior los nodos cercanos ya llegaban a un $SF=7$ pero a partir de las 7 horas.

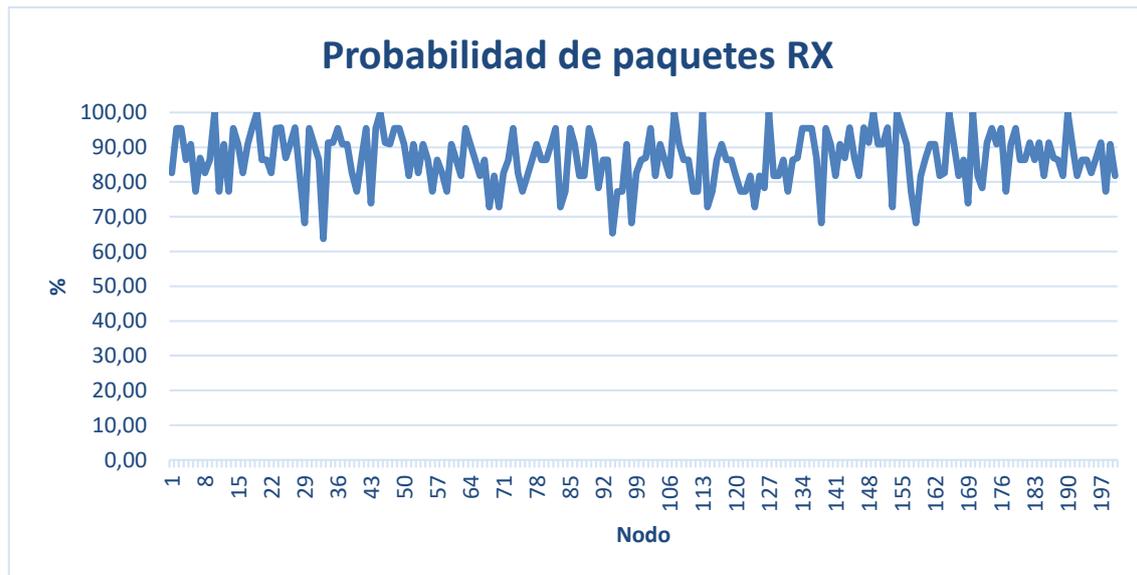


Figura 46. Probabilidad de recepción en los paquetes de subida recibidos con un contador de 5 paquetes.

Como se observa en la Figura 46, en este caso las probabilidades son mucho mayores que en los casos anteriores. El promedio de las probabilidades de éxito en los paquetes de subida recibidos es del 86,61%. Esto se debe a que los nodos convergen con mayor rapidez y por lo tanto los nodos más cercanos envían con un menor SF mayor tiempo que en los dos casos anteriores.

En este caso los primeros cambios de SF se empiezan a efectuar en la marca de tiempo $t= 2$ horas y 30 minutos. Los nodos más cercanos pueden llegar a alcanzar el $SF= 7$ en la marca de tiempo $t= 4$ horas y 30 minutos. Esto permite que los nodos cercanos estén enviando paquetes de subida a un SF un mayor tiempo y permite subir la probabilidad de éxito en 3 puntos.

Una vez analizados los resultados para los distintos contadores de paquetes de subida se va a proceder a la comparación de los resultados y de esta forma entender con mayor claridad a qué se debe.

Si comparamos las tres probabilidades de éxito de recepción de paquetes de subida se pueden observar varias diferencias.

En primer lugar, vamos a comparar la probabilidad con un contador de 20 paquetes con el contador de 10. En este caso claramente el contador de 10 paquetes ofrece mayor probabilidad que el contador de 20, ya que en el primer caso todos los nodos llegan a converger al SF más adecuado. De esta forma los nodos permanecen menos tiempo en el aire y por lo tanto están menos expuestos a las interferencias que suelen haber en un entorno industrial.

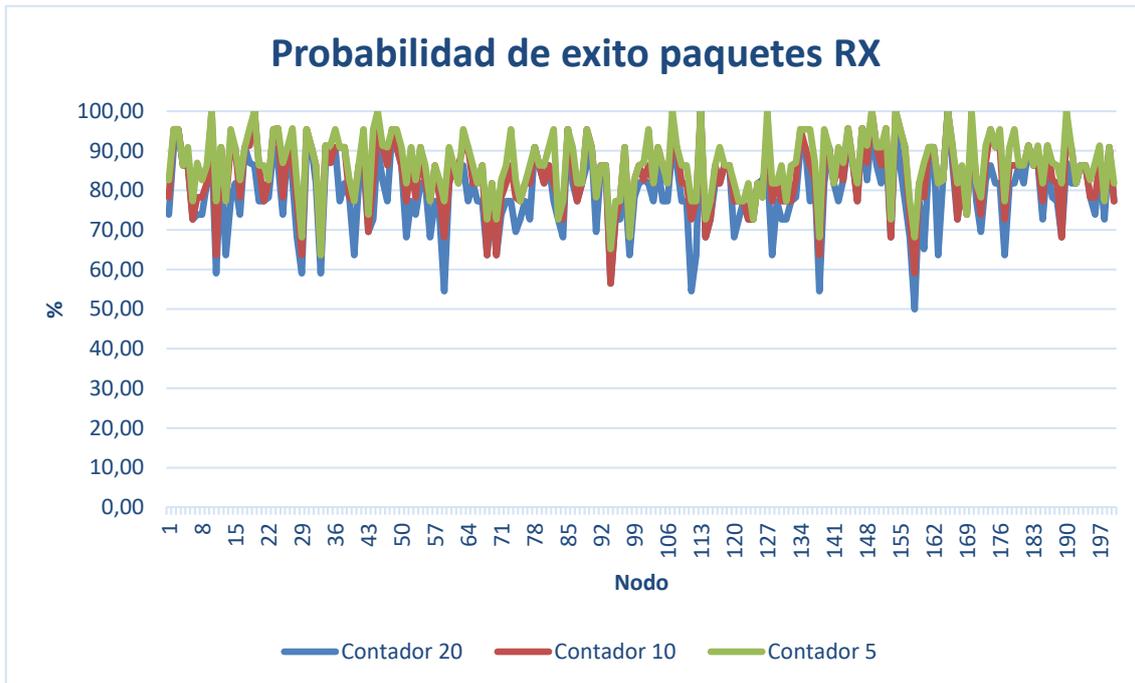


Figura 47. Comparación de las probabilidades de éxito para distintos contadores.

Por otro lado, si comparamos las probabilidades del contador de 10 con el contador de 5, observamos que en ambos casos se llega a converger al SF más adecuado. Pero la diferencia es que, en el caso del contador de 5 paquetes, la convergencia es mucho más rápida que en el contador de 10, lo que permite que el nodo esté un mayor tiempo enviado al SF más adecuado, y por lo tanto como en el caso anterior, está menos expuesto a interferencias. Otra razón por la que en el contador de 5 aumenta la probabilidad de éxito es que, al tener los nodos en distintos SF en un mayor tiempo, el canal está menos saturado y, por lo tanto, existe una menor probabilidad de colisión.

Mediante las 3 pruebas realizadas, se ha comprobado que, al modificar la ventana del contador de paquetes de subida, se puede ofrecer una mayor probabilidad de éxito en la recepción por parte del gateway. La única desventaja que existe en este caso es que no estaríamos siguiendo las especificaciones de la norma, pero por otro lado estaríamos mejorando el rendimiento de la red.

Por otro lado, hay que dejar constancia de que el contador de paquetes perdidos en ningún momento se ha modificado; en todos los momentos de la simulación se ha mantenido en 20.

6.4 Simulación con la implementación del mecanismo ADR modificando el cambio de SF para mensajes de subida

En este apartado se ha realizado otra posible modificación del mecanismo de ADR. Partiendo de los parámetros de configuración del principio, se ha modificado la condición mediante la cual el mecanismo realizaba el cambio de SF.

En esta modificación se ha añadido otra condición para la elección del nuevo SF. El mecanismo establecido por la norma solo nos permite incrementar en uno el SF para aquellos nodos que tengan un valor de Nstep superior a 0.

La modificación realizada mantiene las condiciones existentes, pero se ha añadido una nueva, ya que en el caso de que el Nstep sea superior a 3 nos va a permitir incrementar en dos el valor del

SF, como se observa en la Figura 48. De esta forma los nodos que se encuentran más cerca del gateway podrán converger más rápido ya que las condiciones se lo permiten.

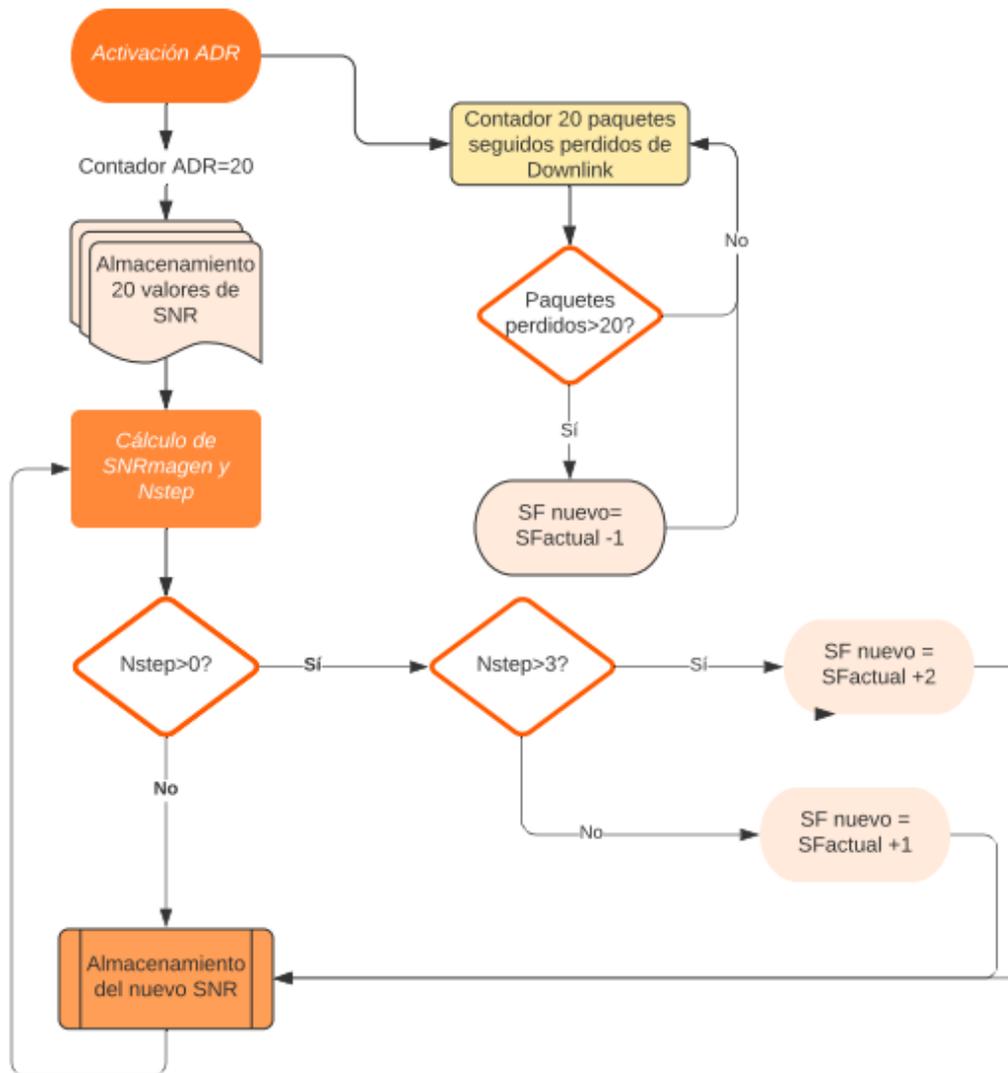


Figura 48. Diagrama del mecanismo de ADR modificado.

El valor de Nstep escogido ha sido de 3 ya que si realizamos la media de los valores de Nstep para cada SF se puede observar en la Tabla 12 como el promedio general redondeado al entero superior es de 3.

SF 12	SF 11	SF 10	SF 9	SF 8	GENERAL
4,25	3,48	2,785	2,21	1,74	2,893

Tabla 12. Promedio del valor de Nstep en cada SF.

En el código, la mejora de la implementación se observa principalmente una vez se ha calculado el valor de Nstep. En la siguiente figura se puede observar cómo se ha implementado esta parte.

```

if (Nstep>0) {
  if (DRNodo<5) {
    if (Nstep>3) {
      if (DRNodo<4) {
        DRNodo=DRNodo+2;
      }else{
        if (DRNodo<5) {
          DRNodo=DRNodo+1; }
        }
      }else{
        if (DRNodo<5) {
          DRNodo=DRNodo+1; }
        }
      }
    }
  }
}

```

Figura 49. Implementación ADR modificado.

Una vez implementada la nueva mejora, se realiza la simulación con los parámetros de simulación iniciales. En la Figura 50 se puede observar cómo, en este mecanismo mejorado, los nodos cambian con mayor rapidez de SF en aquellos casos que los nodos tengan muy buenas condiciones y puedan permitirse efectuar un salto mayor de SF.

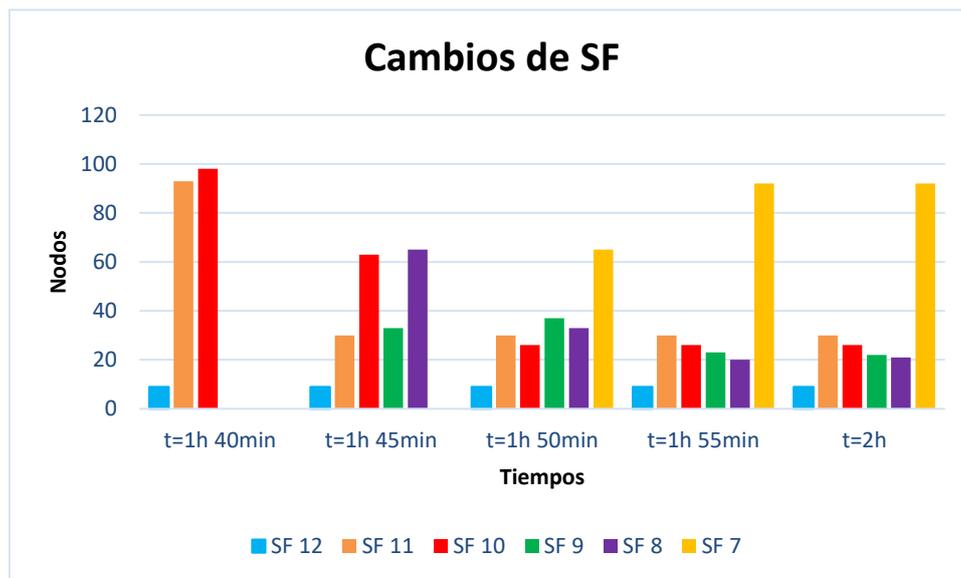


Figura 50. Cambios de SF para saltos de dos SF.

Como se puede observar en la Figura 50, cuando el contador llega a los 20 paquetes recibidos desde la activación del ADR, la mayoría de los nodos al encontrarse en un buen medio se pueden permitir realizar el cambio de dos SF, y no de uno como establece la norma.

Si comparamos con la Figura 34, donde se realiza la simulación con el ADR establecido por la norma, se puede observar que, para que los nodos cercanos lleguen a un SF = 7, deben de llegar a la marca de tiempo t = 2 horas. En la mejora, los nodos más cercanos al realizar un mayor salto llegan a un SF = 7 en la marca de tiempo t = 1 hora y 50 minutos. En este caso, al ser la tasa de upload de 5 minutos, la diferencia de tiempos es de tan solo 10 minutos. Pero en el caso de que esta tasa fuera mucho mayor, se podría estar hablando de una diferencia hasta de horas.

Por otro lado, si nos fijamos en la probabilidad de éxito en la recepción por parte del gateway de los paquetes de upload, podemos ver una mejoría.

Promedio paquetes enviados	Promedio paquetes RX con ADR con salto de 2 SF	% paquetes RX con ADR con salto de 2 SF
133,32	122,43	91,82%

Tabla 13. Valores de la simulación con ADR con salto de 2SF.

Si comparamos la Tabla 13 con la Tabla 9 y 10, sin y con mecanismo de ADR, se puede observar cómo los valores son mejores, aumentando el porcentaje de mensajes recibidos de upload.

Los resultados son coherentes, ya que los nodos cercanos llegan más rápido al SF que más se adapta a sus condiciones y por lo tanto aumenta el porcentaje de paquetes recibidos.

Esta mejora es importante, ya que permite mejorar el mecanismo de ADR especificado por la norma, no solo en cuanto al porcentaje de mensajes recibidos de upload sino al consumo de la batería de los nodos.

6.5 Con la implementación del mecanismo ADR para mensajes de bajada clase B

En este apartado se ha implementado el mecanismo de ADR para los mensajes de bajada de clase B, ya que como se comentó en el apartado de objetivos, la clase B es la que interesa por sus características en comunicación bidireccional.

En este caso, como se puede observar en el siguiente diagrama, para los mensajes de bajada, el máximo SF disponible es el 9, como especifica la norma. Es por ello que, todos aquellos nodos que tengan un SF mayor o igual a 9 en los mensajes de subida, su SF será de 9. En el caso de que los nodos tengan un SF menor de 9, el SF de subida y de bajada será el mismo.

La restricción de no poder aumentar el SF a un número mayor de 9 se debe a una restricción establecida por la norma. Esta restricción se debe ya que, para un SF mayor, los tiempos de los mensajes de clase B serían mayores a los establecidos y, por lo tanto, gran parte de los mensajes se perderían a causa de las colisiones.

Una vez implementado el mecanismo de ADR para mensajes de bajada de clase B, se han realizado las simulaciones para los parámetros de simulación iniciales, con un contador de 20 muestras y una tasa de subida de 5 minutos. En este apartado la tasa para los mensajes de bajada se ha disminuido considerablemente para tener una mayor recepción por parte del nodo, siendo de 7,5 minutos la tasa de bajada.

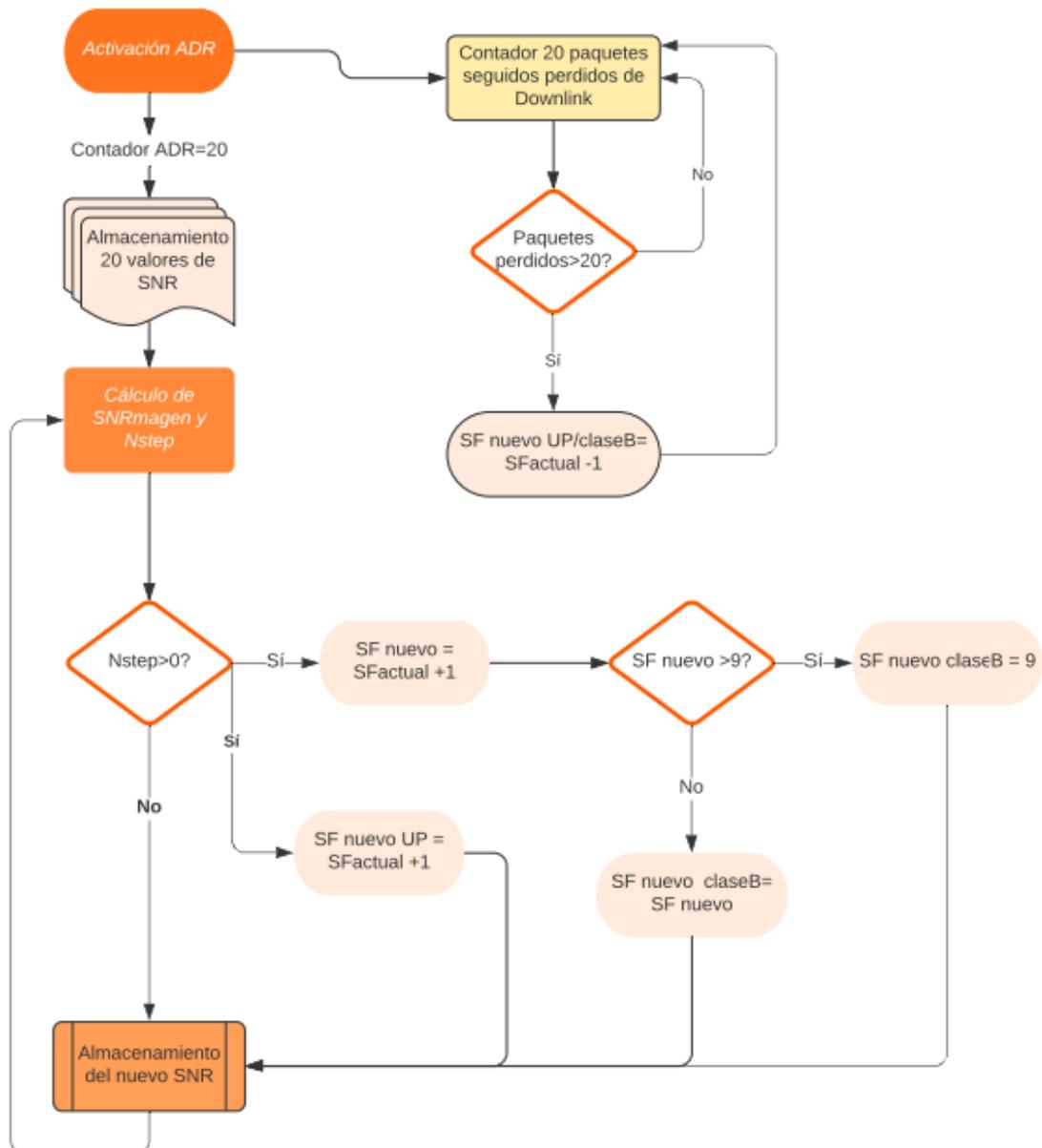


Figura 51. Diagrama del mecanismo de ADR para mensajes clase B.

En primer lugar, vamos a visualizar los cambios de SF que se realizan para los mensajes de bajada.

Mensajes de claseB				
Instante en el que cambia de SF	t= 1h 45min	t= 1h 50min	t= 1h 55min	t= 2h
Instante en el que se envía un clase B	t= 1h 45min	t= 1h 52,5min	NO	t= 2h
SF9	200	200	88	87
SF8	0	0	112	21
SF7	0	0	0	92

Tabla 14. Cambios de SF en paquetes de clase B.

En la tabla podemos observar dos tiempos distintos, en primer lugar, el instante de tiempo en el que se realiza el cambio del valor de la variable del SF para mensajes de bajada. El segundo tiempo muestra el instante de tiempo en el que se envía un mensaje de clase B. Es por ello que, por ejemplo, en el instante de tiempo $t = 1$ hora y 55 minutos se realiza un cambio del valor de la variable, pero dicho cambio no afecta a los mensajes de clase B ya que durante ese instante de tiempo y el siguiente, en $t = 2$ horas, no se realiza ningún envío de mensajes de clase B.

Se puede observar el mapa de calor para el instante $t = 2$ horas como la mayoría de los nodos reciben mensajes de clase B con un SF=7, en color amarillo. Por otra parte, un tercio de los nodos recibe mensajes con un SF=8, en color morado, y más de un cuarto de los nodos reciben mensajes de clase B con un SF=9, en color verde, como indica la norma.

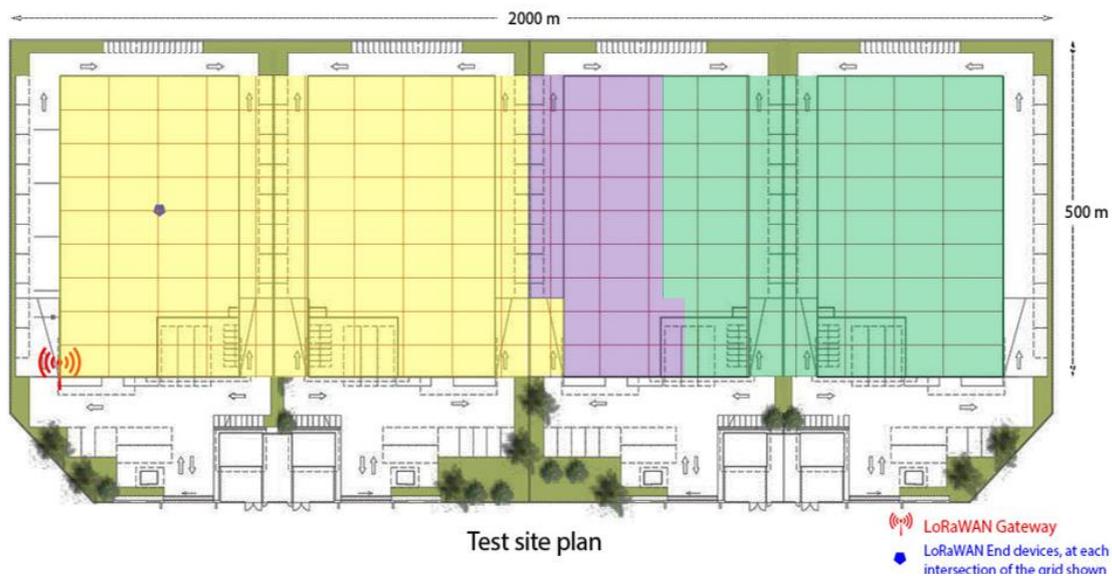


Figura 52. Mapa de calor del SF al que envía el gateway mensajes de clase B.

Una vez analizados los cambios de SF y el envío de los paquetes, se procede a analizar la probabilidad de recepción de los mensajes de clase B.

	sin ADR	con ADR
% paquetes TX	99,23	99,27

Tabla 15. Porcentaje de mensajes de clase B recibidos.

Como se puede observar existe una pequeña mejora para los paquetes de clase B. De esta forma está más cerca de alcanzar el 100% de mensajes que se reciben por parte del gateway en los nodos. Este porcentaje de por sí ya está próximo al 100%, ya que el envío está programado y por lo tanto lo extraño no es su alto porcentaje, sino que exista alguna pérdida, algo normal ya que existen interferencias en el canal.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que aproximadamente dos tercios de los nodos reciben con un SF distinto al establecido por la norma, y el cambio realizado presenta una pequeña mejora.

Capítulo 7. Conclusiones

En primer lugar, como se ha podido ver en el estudio del arte de la tecnología LPWAN, esta tecnología presenta un gran futuro en las comunicaciones de redes de área amplia y de baja potencia. Este trabajo en especial se ha centrado en la tecnología LoRaWAN, la cual se utiliza para la comunicación y administración de dispositivos.

Mediante el simulador ns-3 se han simulado redes LoRaWAN, pero vistas las carencias que presenta el simulador en cuanto a la mejora de las comunicaciones de los dispositivos, se ha optado por presentar un mecanismo que permita modificar la velocidad de datos. Es por ello que se ha optado por implementar el mecanismo de Adaptive Data Rate (ADR). Mediante este mecanismo, como se ha visto en capítulos anteriores, podemos modificar el valor de Spreading Factor (SF) dependiendo de las condiciones que presente el canal de transmisión.

Mediante dicha implementación se han podido obtener varias conclusiones:

- El mecanismo de ADR para nodos de clase B permite mejorar el porcentaje de mensajes recibidos, comparándolo con un SF inicial de 12.
- El mecanismo que especifica la norma se puede mejorar, es por ello que en el trabajo se han realizado varias modificaciones para mejorarlo.
- En la primera mejora, donde varía el contador de mensajes recibidos de subida, se puede observar que conforme se disminuye dicho contador, los porcentajes de recepción mejoran, ya que alcanzan con mayor rapidez el SF que corresponde.
- En la segunda mejora, donde se ha realizado un salto de dos SF en los nodos con mejores condiciones, se puede observar una pequeña mejora ya que los nodos más cercanos alcanzan rápidamente SF más bajos.
- Por último, se ha implementado el mecanismo para mensajes de bajada de clase B, donde los paquetes han podido cambiar de SF para aquellos nodos más cercanos.

Una vez alcanzados los objetivos del Trabajo Fin de Grado, se ha procedido a la redacción de un artículo científico con la colaboración de Instituto Tecnológico de Informática y la Universitat Politècnica de València, para su posible publicación en la revista Applied Sciences (Open Access Journal MDPI) [32].

Capítulo 8. Trabajos futuros

8.1 Mejora del mecanismo implementado

En este trabajo se ha realizado la implementación del ADR siguiendo las especificaciones de la norma. Por otro lado, se han realizado posibles mejoras del mecanismo para distintos casos de aplicación. Pero las simulaciones realizadas han sido para un entorno industrial en el cual los nodos permanecen en todo momento estáticos.

En el caso de querer que los nodos tuvieran movimiento, habría que realizar una mejora del mecanismo. Cuando un nodo se encuentra en movimiento el mecanismo de ADR se debe activar para cada nueva ubicación y por lo tanto se hace casi imposible que el gateway almacene 20 mensajes de subida para una ubicación concreta.

Es por ello que en trabajos futuros se debería modificar el mecanismo. Una de las opciones de mejora sería acortar el contador de mensajes de subida. De esta forma sería más probable que el gateway pudiera almacenar, por ejemplo 5 mensajes, en una misma ubicación.

Esta mejora sería insuficiente ya que si el nodo está en constante movimiento sin realizar ninguna parada no llegaría a almacenar mensajes y por lo tanto habría que añadir otra mejora.

Para esta segunda mejora sería necesario que se guardara la posición del nodo en el momento que activa el ADR, llamando a esta posición la posición cero. Una vez almacenada, si el nodo se mueve alrededor de la posición cero, dentro de un radio específico, habría que permitir que el mecanismo almacenara mensajes siempre que el nodo se encuentre dentro del radio especificado, como se muestra en la Figura 53. En caso de salirse, el nodo debería volver a activar el mecanismo.

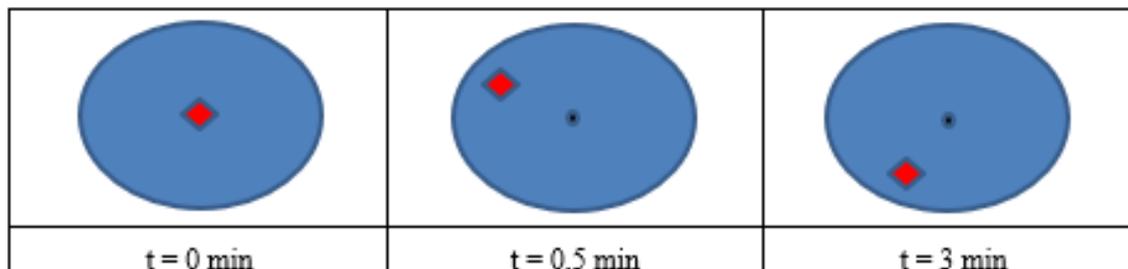


Figura 53. Movilidad del nodo en varios instantes temporales.

Como se observa en la Figura 53, en $t = 0$ el nodo activa el mecanismo de ADR, y por lo tanto el gateway almacena la posición en la que se encuentra y crea un radio de X metros alrededor de dicha posición. En $t = 0,5 \text{ min}$ el nodo se mueve, pero como permanece dentro del radio establecido por el gateway se siguen almacenando los mensajes de subida para el mecanismo ADR activado anteriormente. En $t = 3 \text{ min}$ el nodo vuelve a cambiar de posición, pero como se mantiene dentro del radio no ocurre nada y el gateway continúa almacenando los mensajes de subida para el ADR activado. En el momento que el nodo salga del radio establecido por el gateway, el nodo deberá volver a activar el mecanismo y empezar de nuevo con el contador de mensajes. Como se ha observado, es importante que el contador no sea muy alto.

Sería interesante el desarrollo de esta línea de investigación, ya que los nodos no siempre se encuentran de forma estática en una misma ubicación funcionando como sensor de alguna máquina. En un entorno industrial el nodo puede que tenga movimiento, como en una traspaleta. Puede que se haya instalado un dispositivo en la traspaleta que permita ubicarla, cuando el encargado necesite hacer uso de ella o enviar una alerta al operario que se encuentra usando la traspaleta para que vaya a algún lugar de la nave.

8.2 Despliegue físico

Como se ha podido observar en el apartado de tareas previas, se ha realizado la programación del nodo para que permita el uso de la tecnología LoRaWAN y en especial la clase B. Por otra parte, se realizó la programación del gateway y la puesta en marcha de los servidores.

También se realizó un estudio de posibles despliegues para estudiar el comportamiento de los nodos para distintos escenarios. Pero debido a la crisis sanitaria provocada por el SARS-CoV-2, no se pudieron llevar a cabo los posibles despliegues.

Es por ello que, como trabajo futuro, queda pendiente el despliegue de los dispositivos para los distintos escenarios que se estudiaron, ya que cada uno de ellos aporta algo distinto y los resultados son interesantes para el mejor estudio de la tecnología.

A parte de los escenarios nombrados en tareas previas, existen dos escenarios que no se habían contemplado anteriormente, pero dadas las simulaciones realizadas en el trabajo serían interesantes de llevar a cabo.

En primer lugar, uno de los despliegues a realizar sería los 200 nodos en una nave industrial de similares características. De esta forma podríamos comparar los resultados simulados con los resultados del despliegue real. Dicha comparación sería interesante, ya que el trabajo se centra en entornos industriales y una vez realizada la simulación se puede ver lo realista que ha sido la misma con la realidad.

En segundo lugar, otro despliegue interesante sería ubicar dos gateways dentro del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València, uno en cada extremo como se observa en la Figura 54.



Figura 54. Disposición de los gateways para la movilidad de los nodos.

Pero en este caso, en lugar de tener los nodos estáticos en todo momento, cinco de ellos se encontrarían en constante movimiento por dentro de las instalaciones. De esta forma se podría estudiar el comportamiento de dichos nodos al tener que ir cambiando de gateway dependiendo de la ubicación en la que se encuentren.

Capítulo 9. Bibliografía

- [1] Mahdi H. Miraz, Maaruf Ali and Peter S. Excell, Rich Picking , “A Review on Internet of Things (IoT), Internet of Everything (IoE) and Internet of Nano Things (IoNT)”, IEEE Xplore, 2015.
- [2] Cristoffer Adrián, “IoT: origen, importancia en el presente y perspectiva de futuro”, itop, [Online]. Disponible: <https://www.itop.es/blog/item/iot-origen-importancia-en-el-presente-y-perspectiva-de-futuro.html> .
- [3] Mejía Cruz, Josefina, “HISTORIA DE LA INDUSTRIA 4.0”, Logicbus SA de CV, 2018.
- [4] CIC, “Industria 4.0, la cuarta revolución industrial y la inteligencia operacional”, CIC [Online]. Disponible: <https://www.cic.es/industria-40-revolucion-industrial/>
- [5] Semtech Corporation, “LoRa™ Modulation Basics,” Semtech Corporation, 2015.
- [6] Paul Pickering, “Desarrollar con LoRa para aplicaciones IoT de baja tasa y largo alcance”, [Online]. Disponible: <https://www.digikey.es/es/articles/techzone/2017/jun/develop-lora-for-low-rate-long-range-iot-applications>
- [7] Youngjune Oh, Jongwon Lee, and Chong-Kwon Kim, “TRILO: A Traffic Indication-Based Downlink Communication Protocol for LoRaWAN”, Hindawi, 2018.
- [8] Sebas, “Haciendo IoT con LoRa: Capítulo 1.- ¿Qué es LoRa y LoRaWAN?”, Medium, [Online]. Disponible: <https://medium.com/beelan/haciendo-iot-con-lora-cap%C3%ADtulo-1-qu%C3%A9-es-lora-y-lorawan-8c08d44208e8>
- [9] LoRa Alliance Technical Committee, LoRaWAN Specification, 1.1 ed., N. Sornin, Ed., 2017.
- [10] Martijn Saelens, Jeroen Hoebeke, Adnan Shahid and Eli De Poorter, “Impact of EU duty cycle and transmission power limitations for sub-GHz LPWAN SRDs: an overview and future challenges”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019.
- [11] Semtech Corporation, “Understanding the LoRa Adaptive Data Rate”, Semtech Corporation, 2019.
- [12] Gemalto, Actility and Semtech, “LoRaWAN SECURITY”, LoRa ALLIANCE, 2017.
- [13] Aprendiendo Arduino, “Sigfox”, Aprendiendo Arduino, [Online]. Disponible: <http://www.aprendiendoarduino.com/category/arduino/page/2/> .
- [14] Wael Ayoub, Abed Ellatif Samhat, Fabienne Nouvel, Mohamad Mroue and Jean-christophe Prevotet, “Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs standards and Supported Mobility”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018.
- [15] Pere Tuset-Peiró, Borja Martínez y Xavier Vilajosana, “¿Qué es NB-IoT?”, Universitat Oberta de Catalunya, [Online]. Disponible: <http://informatica.blogs.uoc.edu/2018/11/22/que-es-nb-iot/>
- [16] ALFAIOT, “NB-IoT vs LoRa vs SigFox”, ALFAIOT, [Online]. Disponible: <https://alfaiot.com/blog/ultimas-noticias-2/post/nb-iot-vs-lora-vs-sigfox-10> .
- [17] Al-Fuqaha, A., guizani, m., Mohammadi, M., Aledhari, M. and Ayyash, M. ‘Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols and applications’, IEEE Communications Surveys & Tutorials 17, Fourthquarter 2015.



- [18] Joseph Finnegan, Stephen Brown and Ronan Farrel, “Evaluating the Scalability of LoRaWAN Gateways for Class B Communication in ns-3”, IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), 2018.
- [19] Shengyang Li, Usman Raza and Aftab Khan, “How Agile is the Adaptive Data Rate Mechanism of LoRaWAN?”, IEEE, 2018.
- [20] Michele Luvisotto, Federico Tramarin, Lorenzo Vangelista and Stefano Vitturi, “On the Use of LoRaWAN for Indoor Industrial IoT Applications”, Hindawi, 2018.
- [21] Sungryul Kim and Younghwan Yoo, “Contention-Aware Adaptive Data Rate for Throughput Optimization in LoRaWAN”, Sensors, 2018.
- [22] Duc-Tuyen Ta, Kinda Khawam, Samer Lahoud, Cédric Adjih, Steven Martin, “LoRa-MAB: A Flexible Simulator for Decentralized Learning Resource Allocation in IoT Networks”, HAL, 2020.
- [23] Khaled Q. Abdelfadeel, Victor Cionca, Dirk Pesch, “Fair Adaptive Data Rate Allocation and Power Control in LoRaWAN”, IEEE, 2018.
- [24] Simulator MBED, [Online]. Disponible: <https://simulator.mbed.com/> .
- [25] The Things Network, [Online]. Disponible: <https://www.thethingsnetwork.org/> .
- [26] LoRa MAC Node, [Online]. Disponible: <https://github.com/Lora-net/LoRaMac-node> .
- [27] Chirp Stack, [Online]. Disponible: <https://www.chirpstack.io/> .
- [28] ns-3 Network Simulator, [Online]. Disponible: <https://www.nsnam.org/> .
- [29] Semtech, “LoRa Modem Design Guide”, Semtech, 2013.
- [30] ns-3 Model Library, [Online]. Disponible: https://www.nsnam.org/doxygen/classns3_1_1_hybrid_buildings_propagation_loss_model.html#details .
- [31] ns3-lorawan-class-B, [Online]. Disponible: <https://github.com/ConstantJoe/ns3-lorawan-class-B> .
- [32] Applied Sciences — Open Access Journal, [Online]. Disponible: <https://www.mdpi.com/journal/applsci>