



MODELADO DE REDES LORAWAN APLICADAS A LA CONSERVACIÓN PREVENTIVA DE PATRIMONIO CULTURAL

Alberto Andreu Dólera

Tutor: Ángel Perles Ivars

Trabajo Fin de Máster presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Máster en Ingeniería Telecomunicación

Curso 2018-19

Valencia, 10 de septiembre de 2019



Resumen

El siguiente trabajo contiene el análisis de una red LoRaWAN destinada a la monitorización de patrimonio cultural a través del modelado de distintas opciones de red, las cuales han sido simuladas en un entorno virtual.

El modelado de las distintas redes simuladas se ha llevado a cabo especificando, en primer lugar, los medibles que va a ser monitorizados y los componentes principales que forman la red. Posteriormente han sido definidas las distintas configuraciones de red, variando el número de componentes que la forman como sus parámetros de transmisión.

La simulación de los distintos modelados de red se ha realizado mediante un framework de simulación denominado FLoRa, teniendo en cuenta las limitaciones encontradas en el propio simulador, con el fin de abarcar el mayor número de opciones de red. A partir de los resultados obtenidos se ha evaluado, para cada modelado, la escalabilidad de la red y el consumo de energía de los nodos asociados, para determinar la viabilidad de cara al diseño de una red LoRaWAN sobre un entorno real.

Resum

El següent treball conté l'anàlisi d'una xarxa LoRaWAN, destinada al monitoratge de patrimoni cultural a través del modelatge de diferents opcions de xarxa, les quals han sigut simulades en un entorn virtual.

El modelatge de les diferents xarxes simulades s'ha dut a terme especificant, en primer lloc, els mesurables que serà monitorats i els components principals que formen la xarxa. Posteriorment han sigut definides les diferents configuracions de xarxa, variant el número de components que la formen com els seus paràmetres de transmissió.

La simulació dels diferents modelatges de xarxa s'ha realitzat mitjançant un framework de simulació denominat FLoRa, tenint en compte les limitacions oposades en el propi simulador, amb la finalitat d'abastar el major número d'opcions de xarxa. A partir dels resultats obtinguts s'ha avaluat, per a cada modelatge, l'escalabilitat de la xarxa i el consum d'energia dels nodes associats, per a determinar la viabilitat de cara al disseny d'una xarxa LoRaWAN sobre un entorn real.



Abstract

The following project contains the analysis of a LoRaWAN network aimed at cultural heritage monitoring through the modelling of different network options, which have been simulated in a virtual environment.

The modelling of the different simulated networks has been carried out specifying the measurable that will be monitored and the main components that make up the network firstly. Subsequently, different network configurations have been defined, changing the number of components that make up it as their transmission parameters.

The simulation of the different network modelling has been carried out through a simulation framework called FLoRa, considering the limitations found in the simulator, in order to cover the largest number of network options. Based on the result obtained, the scalability of the network and the energy consumption of the associated nodes have been evaluated for each modelling, to decide the viability of design a LoRaWAN network over a real environment.



Índice

Capítulo 1.	Introducción	7
Capítulo 2.	Objetivos del TFM	9
Capítulo 3.	Metodología de trabajo del TFM.....	10
3.1	Gestión del proyecto.....	10
3.2	Distribución de tareas.....	10
3.3	Diagrama temporal.....	11
Capítulo 4.	Contexto asociado al proyecto	12
4.1	Internet de las Cosas.....	12
4.1.1	Arquitectura IoT.....	13
4.1.2	Aplicaciones IoT	14
4.2	Patrimonio cultural.....	14
4.2.1	Digitalización del patrimonio cultural.....	15
4.2.2	Proyecto CollectionCare	15
Capítulo 5.	Redes LPWAN.....	17
5.1	Características de las redes LPWAN.....	18
5.1.1	Largo alcance	18
5.1.2	Baja potencia	18
5.1.3	Bajo coste	19
5.1.4	Escalabilidad	19
5.2	Tecnologías LPWAN.....	20
5.2.1	Sigfox	20
5.2.2	Ingenu RPMA	20
5.2.3	Weightless-SIG	21
5.2.4	NB-IoT	21
5.2.5	DASH7	21
5.2.6	LoRaWAN	22
5.2.7	Comparativa de las tecnologías LPWAN.....	22
Capítulo 6.	LoRaWAN	24
6.1	LoRa.....	24
6.1.1	Parámetros de comunicación.....	25



6.1.2	Normativa y regulación en Europa.....	25
6.1.3	Fundamentos de la modulación LoRa	28
6.1.4	Propiedades de la modulación LoRa	30
6.1.5	Estructura del paquete LoRa	32
6.2	Características generales de LoRaWAN	33
6.2.1	Arquitectura del sistema.....	33
6.2.2	Duración de la batería	33
6.2.3	Capacidad de la red	34
6.2.4	Clases de dispositivos.....	34
6.2.5	Seguridad.....	36
Capítulo 7.	Planificación de la red	37
7.1	Destino de la red.....	37
7.2	Componentes de la red	37
7.2.1	Nodos de la red.....	37
7.2.2	Puerta de enlace de la red.....	38
7.3	Principales objetivos de la red.....	39
7.3.1	Escalabilidad	39
7.3.2	Consumo de energía	40
7.4	Modelo de propagación de la señal	41
7.4.1	Log-distance path loss model.....	41
7.4.2	Parámetros del modelo de propagación.....	42
7.5	Entorno de simulación.....	42
7.5.1	OMNeT++.....	42
7.5.2	FLoRa.....	43
7.5.3	Limitaciones de FLoRa	44
7.5.4	LoRaSim.....	44
7.6	Configuración del entorno de simulación	44
7.6.1	Características físicas del entorno	44
7.6.2	Caracterización del consumo.....	44
7.6.3	Caracterización de los canales LoRa.....	45
7.6.4	Descripción de la red.....	45
7.6.5	Configuración de la red	45
7.7	Definición de los modelados de red	46



Capítulo 8.	Resultados de la red.....	47
8.1	Modelados de red con una puerta de enlace.....	47
8.1.1	Modelado 1: 1 canal de comunicación activo	48
8.1.2	Modelado 2: 2 canales de comunicación activos	49
8.1.3	Modelado 3: 4 canales de comunicación activos	51
8.1.4	Modelado 4: 8 canales de comunicación activos	52
8.1.5	Comparativa de los modelados con una puerta de enlace	53
8.2	Modelados de red con dos puertas de enlace	57
8.2.1	Modelado 5: 1 canal de comunicación activo	57
8.2.2	Modelado 6: 2 canales de comunicación activos	58
8.2.3	Modelado 7: 4 canales de comunicación activos	59
8.2.4	Modelado 8: 8 canales de comunicación activos	60
8.2.5	Comparativa de los modelados con dos puertas de enlace.....	60
Capítulo 9.	Conclusiones y propuesta de trabajo futuro	64
9.1	Conclusiones	64
9.2	Propuesta de trabajo futuro	64
Capítulo 10.	Bibliografía.....	66
Anexos.....		68
A.	Fichero xml de consume de energía	68
B.	Código de descripción de la topología de red	69
C.	Archivo de configuración inicial de simulación de red.....	71



Capítulo 1. Introducción

El siglo XX fue testigo de numerosas tecnologías que revolucionaron la sociedad del momento y que son precursoras de las actuales. Hacia comienzos de siglo el marco de la segunda revolución industrial auguraba una importante transformación de la sociedad. Durante la primera mitad de este siglo se sucedieron hechos tan importantes como la creación del primer sistema práctico de radiocomunicación, el nacimiento de los primeros sistemas radar o la fabricación de las primeras computadoras. La telefonía era por entonces una tecnología joven poco inaccesible para una sociedad lastrada económicamente a consecuencia de los periodos bélicos sucedidos. Por aquel entonces, el sector de las telecomunicaciones aun no formaba parte de la sociedad y el acceso a la información de limitaba a los periódicos.

Durante la segunda mitad del siglo tuvieron lugar algunos de los acontecimientos tecnológicos más importantes. Al final de la década de los 60 nació la primera red interconectada denominada ARPANET, precursora de Internet, que vería la luz tal como lo conocemos en la última década del siglo. La telefonía móvil también nacería durante este periodo, concretamente en los años 80. Durante las dos últimas décadas del siglo se sucedieron dos generaciones de tecnologías móviles que ofrecerían únicamente comunicaciones de voz y mensajería de texto.

El siglo XXI trajo consigo la tercera generación de tecnologías móviles, que puso en el mercado la comunicación de datos unificando de esta manera la telefonía móvil e Internet. A partir de este momento se consolidaría la sociedad de la información, y estas tecnologías comenzaron a formar parte del día a día de las personas. Al final de la década aparecieron los primeros Smartphones o teléfonos inteligentes, con características similares a las computadoras, contando con un sistema operativo y acceso a Internet. A partir de este momento las personas quedan interconectadas a través de la red, con una disponibilidad de información casi infinita.

La tecnología, lejos de frenarse, ha puesto en el mercado durante esta segunda década la cuarta y la quinta generación de tecnologías móviles, con sistemas más eficientes en velocidad, consumo o calidad. Paralelamente Internet ha ido evolucionando, aumentando el volumen de datos y la velocidad de acceso a ellos, y se han desarrollado nuevas tecnologías computacionales como la inteligencia artificial y la computación en la nube. Estos cambios han dado lugar al nacimiento de un nuevo concepto que busca dotar de autonomía a objetos tangibles interconectándolos, conocido como Internet of Things, IoT o Internet de las cosas. Este nuevo concepto ha supuesto una nueva revolución en la sociedad, reflejada en los numerosos campos de aplicación que ha introducido IoT, desde sistemas de riego agrícola a sistemas de localización de aparcamiento, e incluso sistemas que controlan aspectos tan cotidianos como llenar la nevera. Según Cisco, se espera que para el próximo año 2020, más de 50 billones de dispositivos estén conectados a la red.

Por supuesto, el sector cultural se encuentra inmerso en este proceso de adaptación tecnológica. Las aplicaciones IoT permiten superar barreras geográficas y ofrecer una vista cultural en zonas muy lejanas entre sí en el espacio e incluso en el tiempo. El IoT se hace un hueco en este sector a través acciones como la monitorización del patrimonio cultural para mejorar la conservación de aspectos culturales expuestos al deterioro.

El trasfondo del Internet de las cosas ha supuesto un importante desafío a la hora de optimizar la extensa gama de aplicaciones, buscando la eficiencia energética, la seguridad y la gestión eficaz de los recursos necesarios para su implementación. A raíz de esto han surgido nuevas tecnologías



de red denominadas LPWAN que buscan cubrir áreas amplias con un mínimo gasto energético. Su ausencia de estandarización ha supuesto la aparición de múltiples especificaciones, entre las que está LoRaWAN, una de las cuales está teniendo una mayor puesta en escena.

La evolución tecnológica no cesa. La tecnología 5G apenas ha comenzado su implantación y el IoT tiene un largo camino por delante. Sin embargo, ya han aparecido los primeros artículos que hablan sobre la sexta generación de tecnologías móviles y un nuevo concepto que ha sido llamado Internet de los sentidos. Estos hechos dejan claro que la sociedad de la información actual debe de estar preparada para afrontar los desafíos que está generando y que va a generar el IoT en su transformación, sin perder de vista en ningún momento la aparición de los retos tecnológicos que están por llegar.



Capítulo 2. Objetivos del TFM

El objetivo del presente proyecto es el estudio de implantación de una red LoRaWAN destinada a la conservación preventiva del patrimonio cultural, abordando exclusivamente el proceso de comunicación entre los nodos y la estación o estaciones base que forman la red. Este estudio está basado principalmente en un entorno virtual debido a la falta de datos para un entorno real que definan el comportamiento de la señal en dicho entorno o el consumo energético. No obstante, el entorno virtual está orientado a valores realistas con el objetivo de obtener resultados evaluables para la posible continuación del proyecto.

El proyecto se centra en escoger la tecnología idónea para el diseño de la red y establecer diversas condiciones, variando factores fundamentales de la red para generar diferentes modelados. Estos serán simulados y posteriormente se evaluarán para sacar conclusiones orientadas a una solución real de red destinada a la conservación del preventiva del patrimonio cultural en el campus de Vera de la Universitat Politècnica de València.

Capítulo 3. Metodología de trabajo del TFM

3.1 Gestión del proyecto

El proyecto se ha gestionado de manera que su desarrollo ha quedado dividido en cuatro puntos: la contextualización del entorno IoT y las tecnologías LPWAN emergentes, el estudio teórico de la especificación LoRaWAN, la investigación de los distintos entornos de simulación disponibles y su adaptación al objetivo del proyecto y, por último, la planificación y ejecución de simulaciones llevadas a cabo en el entorno de simulación elegido. Las tareas llevadas a cabo en cada uno de los puntos mencionados se van a detallar a continuación.

3.2 Distribución de tareas

El primer punto consiste en la contextualización general del proyecto de cara a conocer el estado actual del Internet de las Cosas y las aplicaciones relacionadas con el patrimonio cultural. Las tareas llevadas a cabo han sido las siguientes:

- Estudio general de IoT.
- Investigación de proyectos que relacionan el patrimonio cultural con la tecnología.
- Estudio general de las soluciones LPWAN existentes.

El segundo punto también es de carácter teórico. Consiste en el análisis de la especificación de red LoRaWAN. Las tareas asociadas son las siguientes:

- Análisis de la capa física LoRa.
- Estudio de las características de LoRaWAN.

Como tercer punto, se han investigado los simuladores disponibles de la especificación de red LoRaWAN para usarlo en este proyecto. Se ha seleccionado el simulador que mejores criterios presenta y se ha adaptado a las condiciones requeridas. A continuación, las tareas llevadas a cabo:

- Investigación del simulador LoRaSim de Simpy.
- Investigación del simulador FLoRa de OMNeT++.
- Modificación de los códigos de componente de FLoRa para adaptarlos al proyecto.

El último punto ha consistido en planificar distintos modelados de red, variando en el simulador determinados factores críticos. Estos modelados han sido simulados y a partir de ellos se han obtenido los datos específicos para el objetivo del proyecto. Las tareas realizadas en este último punto son las siguientes:

- Planificación de los modelados de red.
- Creación de un archivo de configuración que abarque todos los modelados planificados.
- Simulación de los modelados de red.
- Obtención de datos de escalabilidad y consumo de energía.

3.3 Diagrama temporal

A partir de las tareas enumeradas anteriormente, se ha construido el diagrama de Gantt que refleja la figura 1. El proyecto se comenzó a realizar a mediados de diciembre de 2018 y se ha finalizado a principios de septiembre, tomando una dedicación semanal media de 7 horas semanales. La tabla 1 muestra las fechas exactas de comienzo y fin de cada tarea.

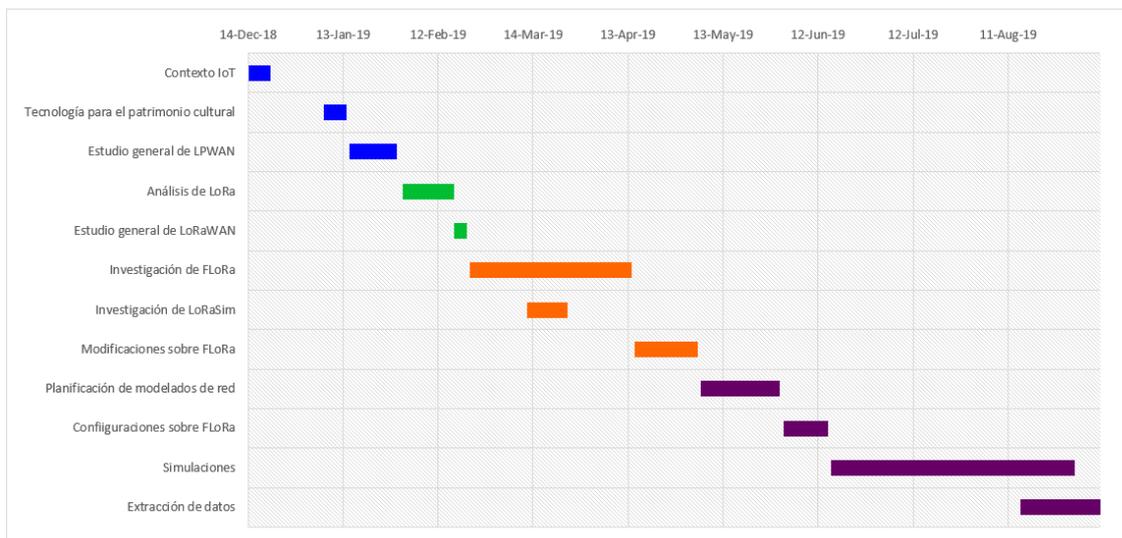


Figura 1. Diagrama de Gant.

Banda	Comienzo	Finalización
Contextualización general de IoT	14-Dic	21-Dic
Investigación de proyectos tecnológicos de patrimonio cultural	7-Ene	14-Ene
Estudio general de las redes LPWAN	15-Ene	30-Ene
Análisis de la capa física LoRa	1-Feb	17-Feb
Estudio general de la especificación LoRaWAN	17-Feb	21-Feb
Investigación del simulador FLoRa	22-Feb	14-Abr
Investigación del simulador LoRaSim	13-Mar	25-Mar
Modificaciones sobre el simulador FLoRa	15-Abr	5-May
Planificación de modelados de red	6-May	29-May
Creación de las configuraciones de simulación en FLoRa	30-May	15-Jun
Simulación de los modelados de red	22-Jun	1-Sep
Extracción y presentación de datos	15-Ago	9-Sep

Tabla 1. Tareas del proyecto

Capítulo 4. Contexto asociado al proyecto

4.1 Internet de las Cosas

Internet de las cosas o IoT (Internet of Things) es un término usado para hablar de la conectividad entre objetos físicos que ha aparecido en la última década como un referente tecnológico. Si embargo, no se ha consolidado una definición precisa. A raíz de las múltiples definiciones dadas por distintas empresas, organismos de estandarización y grupos de investigación, la iniciativa IoT del IEEE ha desarrollado un análisis con el objetivo de unificar una definición del Internet de las cosas (Roberto Minerva et al., 2015).

IoT es una red auto-configuradora, adaptable y con alta complejidad que interconecta objetos a Internet mediante protocolos de comunicación. Estos objetos proporcionan servicios sin la necesidad de intervención humana, tales como captura de datos, comunicación o capacidad de actuación a través de interfaces inteligentes, y tienen disponibilidad desde cualquier lugar. Las características principales que definen los objetos en un entorno IoT se muestran en la figura 2, y son listadas a continuación:

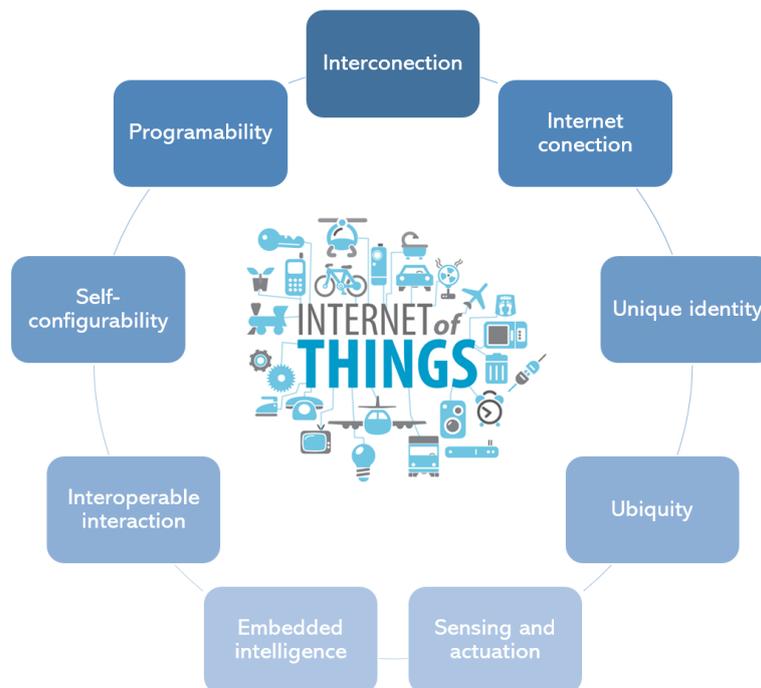


Figura 2. Características de IoT.

- Interconexión de cualquier objeto físico relevante para un usuario o aplicación IoT.
- No existe una intranet o una extranet propia de objetos, se conectan a Internet.
- Cada objeto es únicamente identificable.
- Cualquier objeto del entorno IoT está disponible en cualquier lugar donde se necesite y en cualquier momento que sea necesario.
- Los objetos llevan integrados sensores y/o actuadores encargados de capturar y procesar la información.

- Los objetos también integran herramientas de inteligencia y conocimiento.
- La comunicación entre objetos se realiza mediante protocolos de comunicación estándar.
- Los objetos son auto-configurables, es decir, gestionan sus recursos tanto software como hardware para evitar las limitaciones de escalabilidad consecuencia de la heterogeneidad de los dispositivos y la gran cantidad de conexiones a la red.
- Cada objeto tiene su función programada específica que depende de su propio objetivo.

4.1.1 Arquitectura IoT

Actualmente no existe una arquitectura IoT estandarizada, lo cual contribuye a una confusión en la definición de los sistemas IoT. Un modelo genérico de arquitectura IoT se muestra en la figura 3 (K. Patel et al., 2016). La funcionalidad de cada capa se detalla a continuación.

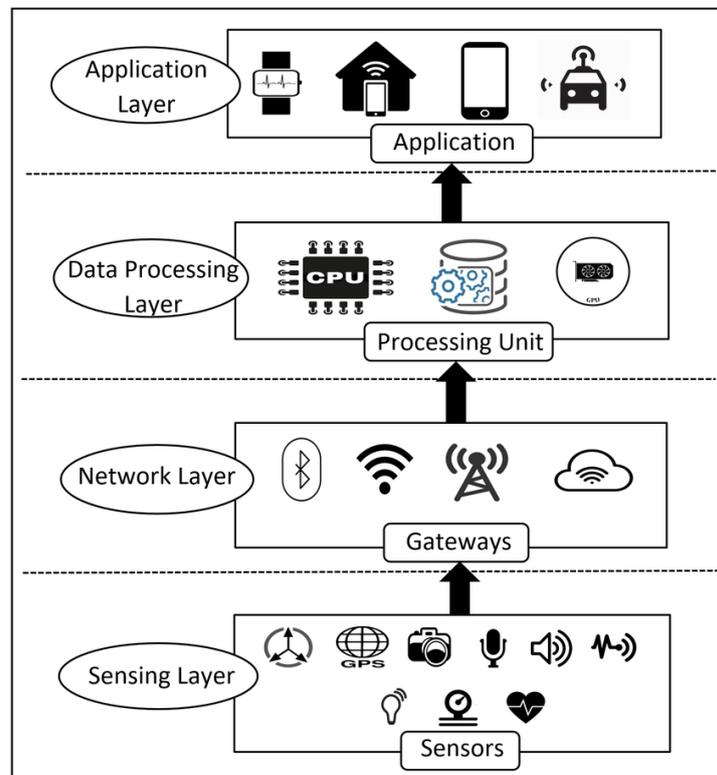


Figura 3. Arquitectura IoT.

- **Sensores/actuadores**
Los sensores y los actuadores son los encargados de conectar el mundo físico y digital. Se encargan de convertir la información capturada en datos para su posterior análisis. Adicionalmente, los actuadores pueden interactuar con el mundo físico.
- **Capa de comunicación**
Para transportar la información capturada por los sensores se necesita una infraestructura de red que admita los protocolos de comunicación necesarios para las comunicaciones M2M que cubran la amplia gama de aplicaciones y servicios que ofrece el IoT.
- **Capa de gestión de servicios**

Esta capa es la encargada del procesamiento de la información capturada a través del análisis, la gestión, el modelado de procesos y el control de seguridad de los dispositivos, adaptándose a las reglas definidas en la aplicación IoT a la cual sirve.

- Capa de aplicación

Cada aplicación IoT cubre entornos o espacios en dominios determinados por el objetivo de la propia aplicación.

4.1.2 Aplicaciones IoT

Las aplicaciones para IoT se extienden por todas las áreas de la vida cotidiana de las personas y las empresas, cubriendo entornos de transporte, sanidad, agricultura, turismo, transporte o cultura entre otros. En la figura 4 se muestra un esquema de algunas de las principales aplicaciones IoT existentes en la actualidad.

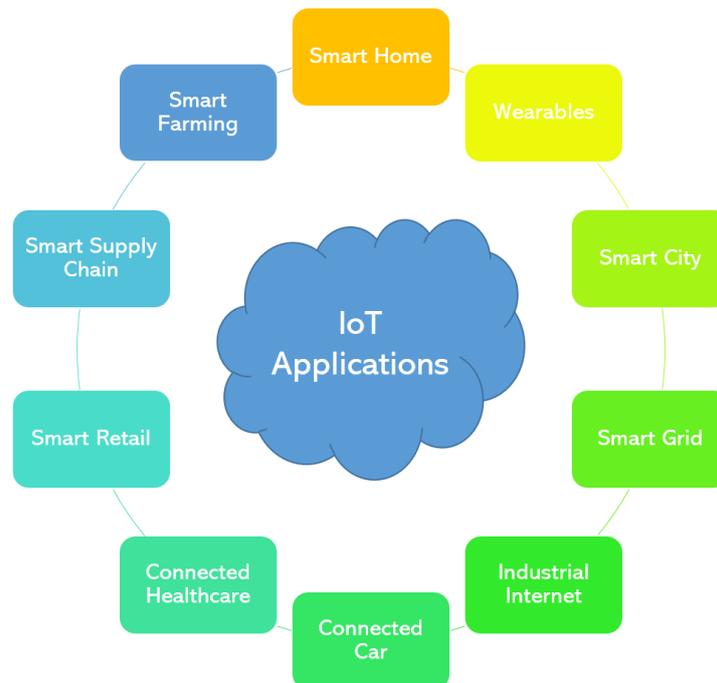


Figura 4. Aplicaciones IoT.

4.2 Patrimonio cultural

La UNESCO define el patrimonio cultural como “el legado de bienes físicos e intangibles de un grupo o una sociedad que se heredan de las generaciones pasadas, se mantienen en el presente y otorgan beneficio a las generaciones futuras”. También define los bienes físicos o tangibles como “edificios, monumentos o artefactos dignos de preservación para el futuro” (UNESCO, s.f.). La aparición del Internet de las cosas ha abierto una nueva ventana a la preservación de los bienes tangibles del patrimonio cultural.

4.2.1 Digitalización del patrimonio cultural

Los continuos cambios tecnológicos de las últimas décadas están afectando a procesos que, hasta hace poco, vivían sin la intervención de la tecnología, como es el caso del patrimonio cultural. Su adaptación a la sociedad digital es un punto importante de cara a afrontar los retos y aprovechar las oportunidades que brindas estos cambios.

La digitalización del patrimonio cultural es vista como una estrategia de conservación y como una oportunidad de difusión, de cara a superar barreras espaciales, física e intelectuales. A día de hoy existen iniciativas para la mejora de las políticas de digitalización del patrimonio cultural, como el proyecto CD-ETA (Collaborative Digitalization of Natural and Cultural Heritage), así como proyectos de investigación destinados a la integración de las nuevas tecnologías en dicho patrimonio para optimizar la conservación, como es el caso del proyecto CollectionCare.

4.2.2 Proyecto CollectionCare

CollectionCare es un proyecto orientado al desarrollo de un sistema de soporte de conservación preventiva dirigido a museos y colecciones de arte a través de la monitorización de las condiciones ambientales de cada obra cultural en entorno de exhibición, almacenamiento, manejo o transporte (CollectionCare, s.f.). La Universitat Politècnica de València y el Institut Valencià de Cultura forman parte de este proyecto.

La conservación preventiva es definida por CollectionCare como “la mitigación del deterioro o daño a causa del envejecimiento del material y los procesos de degradación biológica, mecánica y química a lo largo del tiempo”. Esta degradación depende de las condiciones ambientales a las que quedan expuestas las obras, como la temperatura, la humedad, la luz, los contaminantes del aire o las vibraciones. El material del que está hecho el objeto cultural también influye en dicha degradación.

CollectionCare tiene como objetivo el desarrollo de un sistema innovador de soporte de decisiones para abordar las necesidades de los museos y las colecciones de arte, que integrará sistemas de monitorización, comunicaciones inalámbricas, big data, computación en la nube y modelos de degradación de materiales. Este sistema tiene como objetivo el control de las condiciones de cada artefacto cultural para proporcionar predicciones de degradación y ofrecer soluciones para la conservación óptima.

La figura 5 muestra el esquema de funcionamiento de este sistema de conservación preventiva. En primer lugar, los sensores de un nodo inalámbrico ubicado cerca de la obra se encargan de capturar las condiciones ambientales del entorno donde está localizado. Los datos obtenidos son transmitidos a una plataforma de computación en la nube, donde son almacenados, procesados y evaluados por los estándares normativos y los modelos de degradación de materiales. Finalmente, el sistema CollectionCare proporciona predicciones de degradación, alarmas y recomendaciones de las obras culturales.

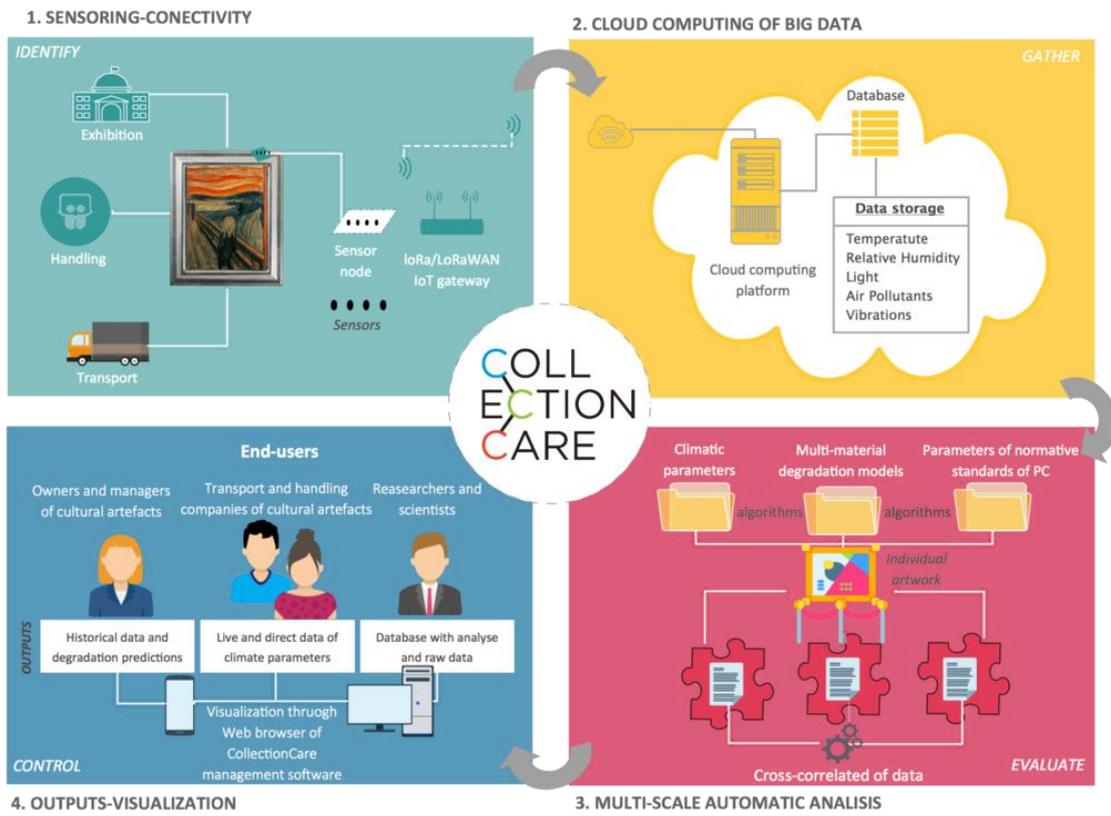


Figura 5. Esquema del sistema de conservación preventiva de CollectionCare.

Capítulo 5. Redes LPWAN

Las redes LPWAN (Low Power Wide Area Networks) son una nueva tecnología de red, surgida a raíz del IoT, que ofrece conectividad de área amplia entre dispositivos de baja potencia y baja velocidad de datos. Esta tecnología nace como complemento de las tecnologías inalámbricas de corto alcance y celulares ya existentes, para abarcar el crecimiento de objetos conectados que se prevé que alcanzará los 30 billones de dispositivos conectados en 2020 (Statista, s.f.), y de los cuales, aproximadamente un 25 % estarán conectados a través de tecnologías LPWAN.

Las tecnologías inalámbricas de corto alcance tales como Bluetooth o ZigBee están limitadas por su alcance medido en decenas de metros. Las redes inalámbricas de área local o WLAN cuenta con una cobertura aún menor y un mayor consumo de energía. Por último, las tecnologías móviles tales como GSM o UMTS, aunque sí proporcionan una cobertura amplia, cuentan con una alta complejidad y un alto coste a causa de su capacidad para manejar servicios de voz y datos de alta velocidad. LPWAN nace de la necesidad de cubrir las carencias de estas tecnologías para afrontar conexiones de baja potencia y largo alcance propias de aplicaciones IoT. La figura 6 muestra las principales ventajas e inconvenientes de las tecnologías de red mencionadas. En la figura 7 se muestra la relación entre la velocidad de datos y el rango de alcance de estas.

<i>Cellular Network</i>	<i>Local Area Network</i>	<i>LPWAN</i>
<i>Ventajas</i>		
Cobertura existente Alta velocidad de datos	Estándares establecidos	Bajo consumo de potencia Bajo coste Posicionamiento
<i>Inconvenientes</i>		
Autonomía Coste total	Duración de las baterías Provisionamiento Coste de red y dependencias	Bajo consumo de potencia Bajo coste Posicionamiento

Figura 6. Ventajas e inconvenientes de las principales tecnologías inalámbricas.



Figura 7. Comparativa de rango y velocidad de las principales tecnologías inalámbricas.

A continuación, se van a detallar las principales características de la tecnología LPWAN a partir de un estudio completo que aborda dicha tecnología (Usman Raza et al., 2017). Posteriormente se detallarán algunas de las tecnologías propietarias existentes y actualmente en uso.

5.1 Características de las redes LPWAN

5.1.1 *Largo alcance*

Las redes LPWAN están diseñadas para ofrecer amplia cobertura y buena propagación de la señal en zonas de interior, obteniendo una ganancia 20 dB superior a la ofrecida por las tecnologías celulares.

La banda de frecuencias usada por la mayoría de las tecnologías LPWAN es la banda Sub-1GHz. Esta banda ofrece una comunicación robusta para conexiones de bajo consumo. En comparación con la banda de 2,4 GHz usada por las tecnologías inalámbricas más populares, experimenta una menor atenuación y un menor desvanecimiento por multirayecto, y está menos congestionada.

Las técnicas de modulación están diseñadas para lograr presupuestos de enlace de 150 ± 10 dB, lo cual supone rangos de unos pocos kilómetros en entornos urbanos y hasta cientos de kilómetros en entornos rurales. La velocidad de modulación se reduce para proporcionar una mayor energía en cada símbolo transmitido, permitiendo a los receptores decodificar correctamente señales muy atenuadas, alcanzando valores de sensibilidad de -130 dBm. Existen dos técnicas de modulación diferentes adoptadas por las tecnologías LPWAN: las técnicas de modulación de banda estrecha y las técnicas de modulación de espectro ensanchado.

5.1.2 *Baja potencia*

Los dispositivos IoT asociados a las tecnologías LPWAN tienen un bajo consumo energético, lo cual es un requisito fundamental para abordar las oportunidades de negocio ofrecidas por esta tecnología. En términos de tiempo, este requisito se traduce en una duración de la batería de un mínimo de 10 años.

Gran parte de las tecnologías inalámbricas de red utilizan una topología de tipo malla, lo cual implica un alto coste para ampliar la cobertura. Frente a esta desventaja, las tecnologías LPWAN hacen uso de una topología en estrella, conectando los dispositivos directamente a las estaciones base de modo que no malgastan energía en tiempos de escucha, evitando así una alta congestión de tráfico. Algunas de estas tecnologías admite adicionalmente topologías de red de árbol y de tipo malla, añadiendo la correspondiente complejidad adicional.

El ciclo de trabajo de un dispositivo asociado a LPWAN permite que un transceptor esté activo únicamente cuando se van a transmitir datos en aplicaciones que solamente requieren enlaces de subida. Si además la aplicación requiere recepción de datos, el dispositivo se asegura estar activo en el instante de transmisión de la estación base a través de mecanismos programados. Aparte de un mecanismo de ahorro de energía, el ciclo de trabajo es un requisito legislativo debido a que el espectro es compartido y debe asegurarse la coexistencia de varios transmisores en el canal.

Los dispositivos suelen tener un diseño muy simplificado, asignando las tareas más complejas a las estaciones base o al servidor de red, de modo que se mantiene un diseño simple y de bajo

coste. Las estaciones base son capaces de transmitir y escuchar a través de múltiples canales o señales ortogonales simultáneas, lo cual proporciona a los dispositivos una inicialización de bajo coste. Adicionalmente se puede dotar a la tecnología de mecanismos para la configuración de las transmisiones o el descarte de paquetes duplicados, aumentando la eficiencia energética.

5.1.3 Bajo coste

Las tecnologías LPWAN permiten la conexión de una gran cantidad de dispositivos IoT con un coste de hardware muy reducido. Esto permite abordar una amplia gama de aplicaciones y competir con el resto de las tecnologías inalámbricas de corto alcance y celulares. Existen varios métodos de reducción del CAPEX (inversiones en bienes de capital) y el OPEX (gastos operativos) para usuarios y operadores. Entre estos métodos se encuentra la reducción de la complejidad del hardware de los dispositivos, la infraestructura de la red o el uso de una banda de frecuencia no licenciada.

La reducción de la complejidad del hardware del dispositivo mencionada anteriormente implica un decremento del coste del dispositivo y permite un aumento de la cantidad de dispositivos conectados, lo que implica a su vez un menor coste global. La infraestructura de la red de tipo estrella permite a una sola estación base conectar miles de dispositivos, reduciendo el coste para el operador de red.

Como último aspecto, el uso de bandas de frecuencia no licenciadas es el más extendido debido al coste que supone para los operadores de red otorgar licencias específicas para LPWAN. Sin embargo, el rendimiento se ve afectado con el aumento de dispositivos conectados a consecuencia de compartir el espectro.

5.1.4 Escalabilidad

LPWAN permite la conexión de una importante cantidad de dispositivos con volúmenes de tráfico reducido y su funcionamiento no se debe ver afectado a consecuencia del aumento de la densidad de dispositivos, considerando varias técnicas para ello.

Las técnicas de diversidad tienen una implicación directa con las estaciones base, empleando comunicaciones multicanal y multiantena para paralelizar las transmisiones y para mejorar la resistencia a interferencias.

La técnica de densificación consiste en aumentar la densidad de estaciones base en ciertas áreas que lo requieran sin causar demasiadas interferencias. Actualmente esta técnica se encuentra en investigación.

Las técnicas de selección de canal y velocidad de datos adaptativas permiten escalar la cantidad de dispositivos conectados a través de la configuración de sus parámetros de comunicación, optimizando la transmisión de datos y mejorando la eficiencia energética. Sin embargo, hay que tener en cuenta que estas técnicas dependen de cada tecnología y de factores como el ciclo de trabajo de los dispositivos o la asimetría de los enlaces. A raíz de este proyecto se verá que la escalabilidad cuenta que limitaciones prácticas.

5.2 Tecnologías LPWAN

Existe una gran cantidad de tecnologías LPWAN dispuestas en el mercado actual (IoT Analytics, 2018) listadas en la tabla 2. En este apartado se van a detallar las tecnologías que lideran el mercado actual, dispuestas en la primera columna de dicha tabla.

Tecnologías LPWAN			
Sigfox	CyanConnode	MIOTY	Thingstream
Ingenu	EC-GSM-IoT	NB-Fi	Wi-Fi HaLow
Weightless-SIG	Helium	Nwave	Wi-SUN
NB-IoT	Hiber	SAT4M2M	Wirepas
DASH7	JupiterMesh	Silver Spring Networks	
LoRaWAN	LTE-M	Telensa	

Tabla 2. Listado de tecnologías LPWAN existente en la actualidad.

5.2.1 Sigfox

Sigfox es una de las soluciones LPWAN más conocidas en el mercado actual, propiedad de la empresa análoga SigFox. Esta tecnología utiliza modulación BPSK y transmite en la banda Sub-GHz utilizando técnicas de banda ultra estrecha (100 Hz) lo conlleva niveles de ruido muy bajos, alta sensibilidad del receptor y un bajo consumo de energía. Sin embargo, el rendimiento máximo que ofrece es de 100 bps, muy inferior al ofrecido por otras tecnologías del mismo tipo.

Cabe destacar que Sigfox nació como una tecnología de comunicación unidireccional que solo permitía enlaces de subida, y que, tras su conversión a un sistema bidireccional, cuenta con una asimetría de enlace significativa.

Las transmisiones en Sigfox utilizan diversidad de tiempo y frecuencia para mejorar su fiabilidad, de modo que un mensaje puede ser transmitido varias veces a través de diferentes canales de frecuencia. En Europa, el rango de frecuencias oscila entre 868,18 y 868,22 MHz y se dispone de un total de 360 canales de 100 Hz. Las estaciones base se encargan de escuchar todos los canales, de modo que cada dispositivo puede elegir un canal de forma autónoma.

5.2.2 Ingenu RPMA

Ingenu es una tecnología patentada, que a diferencia de la mayoría de las tecnologías LPWAN, opera en la banda ISM de 2,4 GHz tomando ventajas de dicha banda como la inexistencia de un límite máximo para el ciclo de trabajo. Esto conlleva un mayor rendimiento y mayor capacidad respecto a tecnologías similares.

Ingenu utiliza la tecnología patentada RPMA (Random Phase Multiple Access) en el esquema de modulación DSSS de espectro ensanchado, utilizado únicamente para enlaces de subida. Para enlaces de bajada utiliza CDMA. RPMA permite que varios transmisores compartan un solo intervalo de tiempo, aumentando ese intervalo en un primer instante y creando una dispersión de acceso al canal dentro de ese intervalo a través de un retardo de desplazamiento aleatorio en cada

transmisor, reduciendo la superposición de señales. RPMA permite al receptor alcanzar valores de sensibilidad de -142 dBm y un presupuesto de enlace de 168 dB. Para ello, los dispositivos ajustan su potencia de transmisión para enviar a la estación base más cercana y limitar la interferencia entre dispositivos cercanos. Finalmente, hay que destacar que la tecnología RPMA cumple las especificaciones del estándar IEEE 802.15.4k.

5.2.3 *Weightless-SIG*

Weightless Special Interest Group es una tecnología compuesta por tres estándares abiertos, con diferentes características de rango y consumo de energía, que operan tanto en bandas licenciadas como no licenciadas. Se denominan Weightless-W, Weightless-N y Weightless-P.

Weightless-W aprovecha las propiedades de propagación de la señal en los espacios blancos del espectro de televisión. Es compatible con múltiples factores de propagación y diferentes esquemas de modulación, tales como 16-QAM o DBPSK. Los dispositivos transmiten utilizando técnicas de banda estrecha, con unas velocidades comprendidas entre 1 kbps y 10 Mbps. El inconveniente principal es que las transmisiones en estos espacios en blanco del espectro de televisión no está permitido en todas las regiones.

Weightless-N es un estándar de banda ultra-estrecha para comunicaciones unidireccionales con una alta eficiencia energética. Utiliza un esquema de modulación DBPSK en la banda Sub-GHz. A consecuencia de la comunicación unidireccional, su uso queda limitado.

El último de estos estándares, Weightless-P, es un estándar para comunicaciones bidireccionales que utiliza esquemas de modulación GMSK y QPSK en la banda Sub-GHz. Cuenta con un ancho de canal de 12,5 kHz y una velocidad de datos comprendida entre 0,2 kbps y 100 kbps.

5.2.4 *NB-IoT*

Narrowband-IoT es una tecnología LPWAN propiedad de 3GPP, basada en la tecnología móvil LTE y compatible con su infraestructura, pudiendo ser implementada dentro de un bloque de recursos físicos LTE o dentro de una banda de guarda LTE. Opera en bandas de frecuencia licenciadas y cuenta con un presupuesto de enlace de 164 dB y una vida útil de 10 años. Su alta capacidad permite servir hasta 50.000 dispositivos por celda.

NB-IoT utiliza un esquema de modulación FDMA para enlaces de subida y OFDMA para enlaces de bajada. La velocidad de datos máxima es de 20 kbps y 250 kbps para los respectivos enlaces de subida y bajada.

5.2.5 *DASH7*

DASH7 es un protocolo de red LPWAN que proporciona conectividad de medio alcance para sensores y actuadores, empleando un esquema de modulación GFSK en la banda de frecuencias Sub-GHz.

A diferencia del resto de tecnologías LPWAN, DASH7 utiliza de forma predeterminada una topología de red en árbol, de forma que los dispositivos se conectan inicialmente a los subcontroladores, y estos se conectan a las estaciones base. Este ciclo de trabajo obtiene valores

de latencia bajos, necesarios para los actuadores. Sin embargo, la complejidad de diseño se ve incrementada.

5.2.6 *LoRaWAN*

LoRaWAN es una de las tecnologías LPWAN más extendidas actualmente junto con Sigfox. El esquema de modulación utilizado es un esquema de modulación propio, denominado LoRa y opera en la banda de frecuencias Sub-GHz. La figura 8 muestra la expansión global de LoRaWAN y Sigfox.

Esta tecnología ha sido la escogida para la realización del presente proyecto por ser una de las más extendidas, lo que posibilita la disponibilidad de simuladores. Además, LoRaWAN cuenta con varias investigaciones de implantación de carácter práctico. En el siguiente capítulo se va a detallar en profundidad esta tecnología LPWAN.

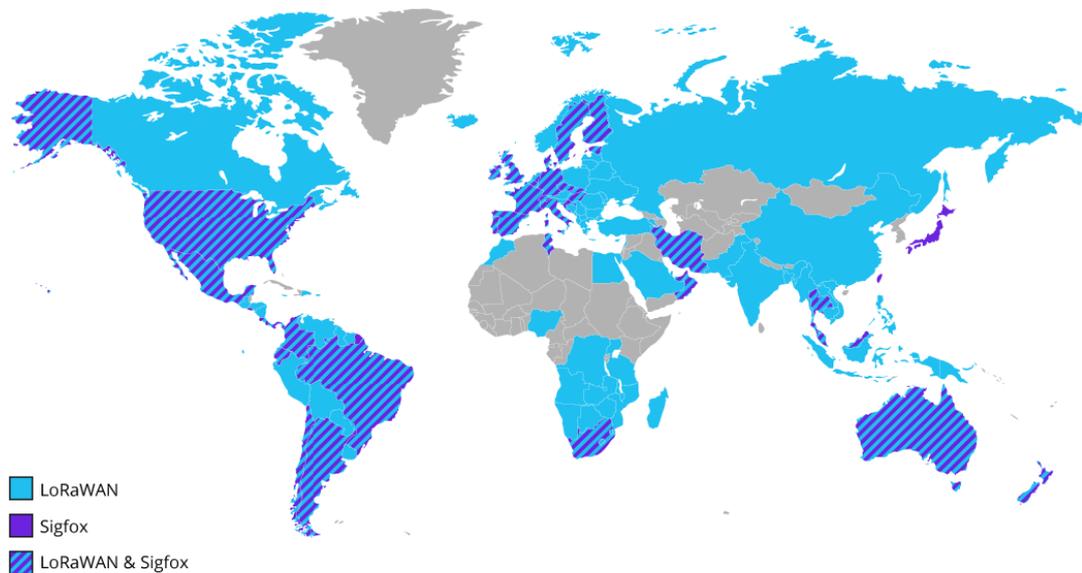


Figura 8. Mapa de extensión de LoRaWAN y Sigfox (fte. networkwordl.es).

5.2.7 *Comparativa de las tecnologías LPWAN*

Como resumen de las tecnologías LPWAN analizadas, la tabla 3 refleja los principales aspectos de estas. Hay que tener en cuenta que ninguna de estas tecnologías puede considerarse la mejor dada la extensa gama de aplicaciones IoT con requisitos muy diferenciados en términos de coste, velocidad, latencia o alcance entre otros.

	SigFox	Ingenu RPMA	Weightless-P	NB-IoT	DASH7	LoRaWAN
Modulación	UNB DBPSK (UL) GFSK (DL)	RPMA-DSSS (UL) CDMA (DL)	GMSK QPSK	FDMA (UL) OFDMA (DL)	GFSK	LoRa
Banda de frecuencias	Sub-GHz	ISM 2,4 GHz	Sub-GHz	1800 MHz 900 MHz 800 MHz	Sub-GHz	Sub-GHz
Velocidad de datos	100 bps (UL) 600 bps (DL)	78 kbps (UL) 19,5 kbps (DL)	30 kbps – 100 kbps	20 kbps (UL) 250 kbps (DL)	9,6 – 166.7 kbps	0,3 – 37,5 kbps
Rango (entorno urbano)	10 km	5 km	2 km	1 km	5 km	5 km
Canales	360	40	Múltiples	Múltiples	Múltiples	10
Ancho de banda	100 Hz	1 MHz	12, 5 kHz	180 KHz	25 kHz 200 KHz	125 KHz 250 KHz
Topología	Estrella	Estrella	Estrella	Estrella	Árbol	Estrella

Tabla 3. Comparativa de las principales tecnologías LPWAN.

Capítulo 6. LoRaWAN

Una vez detallada la existencia de múltiples tecnologías LPWAN, se va a realizar un análisis en profundidad de la especificación de red LoRaWAN (LoRa Alliance, 2017), propiedad de LoRa Alliance, escogida para el desarrollo de este proyecto. Esta elección se debe, principalmente, a su diseño orientado a la optimización de la capacidad, el rango y el coste de la red, así como a la vida de las baterías de los componentes asociados a dicha red.

LoRaWAN define la arquitectura de red y el protocolo de comunicación a excepción de la capa física, denominada LoRa y desarrollada exclusivamente para dicha especificación de red por Semtech, empresa propietaria de esta tecnología. En la figura 9 se muestra la arquitectura de red de distinguiendo las capas definidas por LoRa Alliance y la capa física desarrollada por Semtech.

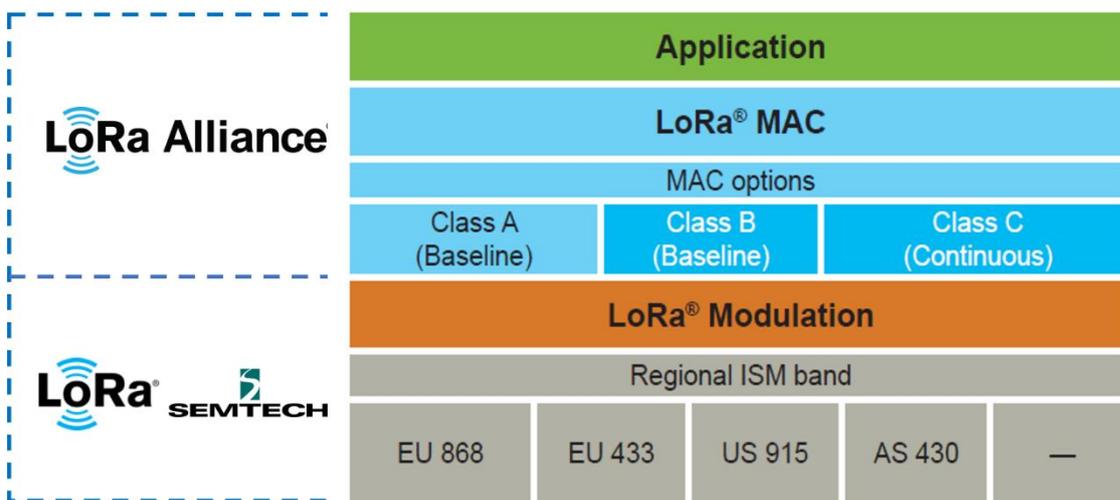


Figura 9. Arquitectura de red LoRaWAN (fte. LoRa Alliance).

6.1 LoRa

LoRa (siglas de Long-Range) es el término utilizado para referirse a la capa física utilizada para crear enlaces de comunicación de largo alcance en las redes LoRaWAN. Esta tecnología ha sido diseñada para habilitar comunicaciones de larga distancia y baja potencia, operando en la banda ISM. LoRa utiliza una modulación, denominada análogamente LoRa, la cual está basada en la modulación CSS (Chirp Spread Spectrum), de características cercanas a la modulación FSK.

La capacidad de LoRa implica que una sola puerta de enlace puede dar cobertura a una ciudad completa, dependiendo por supuesto del entorno y de los obstáculos en el mismo. Sin embargo, cuenta con un coste de enlace mayor que el de otras tecnologías de comunicación estandarizadas y que determina el rango del entorno.

A continuación, se va a detallar cuales son los parámetros de comunicación relevante asociados a LoRa y con ellos se analizará brevemente cómo funciona la modulación LoRa.

6.1.1 Parámetros de comunicación

Los parámetros de comunicación son los principales factores a tener en cuenta en la transmisión de la señal. Estos parámetros son dependientes de la zona en la que operan y están definidos en la especificación LoRaWAN de parámetros regionales (LoRa Alliance, 2017).

- **Canal de comunicación**
Es el medio de transmisión por el cual se propaga la señal. Se representa a través de la frecuencia central del canal, que varía en función de la regulación de cada país, así como el número de canales disponibles.
- **Ancho de banda**
Corresponde al rango de frecuencias usado en la banda de transmisión. Un mayor ancho de banda implica positivamente una mayor velocidad de datos y negativamente a su vez, una menor sensibilidad a causa de la adición de ruido.
- **Factor de ensanchamiento (Spreading factor, SF)**
Define el número de bits usados para codificar un símbolo, que es la relación entre la tasa de símbolos y la tasa de chirp. El incremento de este parámetro disminuye la velocidad de transmisión y, por el contrario, aumenta la protección frente a interferencias y aumenta el alcance de la señal.
- **Potencia de transmisión**
Corresponde a la potencia de la señal a transmitir sujeta a la regulación de cada país y a las limitaciones del hardware.
- **Tasa de codificación (Coding Rate, CR)**
Relación de corrección de errores hacia adelante (Forward Error Correction, FEC) que ofrece protección contra interferencias añadiendo símbolos de control para comprobar que los datos son correctos. Una mayor tasa ofrece mayor protección, pero disminuye la velocidad de datos.

6.1.2 Normativa y regulación en Europa

LoRaWAN especifica en su documentación técnica los valores que puede ofrecer la tecnología LoRa a las redes, no permitiendo que ningún equipo LoRa opere de manera contraria a las normas y regulaciones de cada área definida. Esta documentación ofrece unas regiones definidas de forma amplia, tales como Norteamérica, Europa, China, Japón o India, entre otras. Además, para algunos parámetros especifica una regulación por países.

El primer parámetro por especificar es la frecuencia de operación de LoRa para los canales de comunicación. En la tabla 4 se detalla el rango principal de frecuencias de dichos canales para las regiones más destacadas.

Europa	Norteamérica	China	Japón	India
863 – 870 MHz	902 – 928 MHz	470 – 510 MHz	920 – 925 MHz	865 - 867 MHz

Tabla 4. Rango de frecuencias de operación de LoRa en las principales regiones.

En Europa, LoRa opera en dos bandas de frecuencia distintas. Además de la denominada EU868 mostrada en la tabla anterior, LoRa también opera en Europa en la banda EU433 que comprende el rango de frecuencias entre 433,05 y 434,79 MHz.

Respecto al ancho de banda, Europa define dos opciones disponibles correspondientes a 125 kHz y 250 kHz. En cuanto al factor de ensanchamiento, se definen unos valores comprendidos entre 7 y 12. Ambos parámetros son dependientes entre sí debido a que la especificación define una serie de configuraciones de transmisión permitidas. Estas configuraciones quedan reflejadas en la tabla 5 y establecen la relación entre el factor de ensanchamiento, el ancho de banda y la tasa de bits.

Modulación	Factor de ensanchamiento	Ancho de banda (kHz)	Bitrate (bps)
LoRa	12	125	250
LoRa	11	125	440
LoRa	10	125	980
LoRa	9	125	1760
LoRa	8	125	3125
LoRa	7	125	5470
LoRa	7	250	11000
FSK			50000

Tabla 5. Configuraciones de transmisión definidas en la especificación LoRa.

En lo referente a la potencia de transmisión, la institución encargada de su regulación es la ETSI, Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicación, que regula la banda de frecuencias EU868. La ETSI toma una división de esta banda según la tabla 6, estableciendo un valor máximo para la potencia de transmisión de 14 dBm, a excepción de la banda G3 donde el valor máximo es de 27 dBm (ETSI, 2011).

Banda	Rango de frecuencia (MHz)	Potencia de transmisión	Ciclo de trabajo
G	863 – 870	25 mW / 14 dBm	< 0,1 %
G1	868 – 868,6	25 mW / 14 dBm	< 1 %
G2	868,7 – 869,2	25 mW / 14 dBm	< 0,1 %
G3	869,4 – 869,65	500 mW / 27 dBm	< 10 %
G4	869,7 - 870	25 mW / 14 dBm	< 1 %

Tabla 6. Bandas de frecuencia definidas por la ETSI, correspondientes a la banda EU868.

Finalmente, las tasas de codificación permitidas son 4/5, 4/6, 4/7 y 4/8. Este valor se define según la ecuación (1). Este parámetro añade bits, lo que implica una variación en la tasa de bits de la transmisión.

$$CR = \frac{4}{4 + CR} \quad (1)$$

Por último, falta determinar que LoRaWAN define en Europa un total de 10 canales. Estos canales son atribuidos libremente, a excepción de 3 canales que deben implementarse en cada uno de los dispositivos finales, reflejados en la tabla 7.

Frecuencia de canal	Ancho de banda	Bitrate
868,10 MHz	125 kHz	0,3 – 5 kbps
868,30 MHz		
868,0 MHz		

Tabla 7. Relación de canales LoRa fijos para la banda EU868.

Existe una red LoRaWAN para Internet de las cosas llamada The Things Network. Es una red global, abierta y miembro de LoRa Alliance. Está formada por una comunidad que cuenta con más de 75.000 miembros en 140 países, y en la actualidad posee algo más de 7.800 puertas de enlace. Esta red define los canales de transmisión que usa en cada banda de frecuencias. En la tabla 8 se muestran los canales definidos en la banda EU868, distinguiendo los canales usados para enlaces de subida y bajada.

Tipo de enlace	Frecuencia central (MHz)	Factor de ensanchamiento	Ancho de banda (kHz)
Uplink/Downlink	868.1	7-12	125
Uplink/Downlink	868.3	7-12	125
		7	250
Uplink/Downlink	868.5	7-12	125
Uplink/Downlink	867,1	7-12	125
Uplink/Downlink	867,3	7-12	125
Uplink/Downlink	867,5	7-12	125
Uplink/Downlink	867,7	7-12	125
Uplink/Downlink	867,9	7-12	125
Uplink/Downlink	868,8	Modulación FSK	
Downlink	869,525	9	125

Tabla 8. Canales de la red definidos por The Things Network.

6.1.3 Fundamentos de la modulación LoRa

LoRa es una técnica de modulación de espectro ensanchado basada en la modulación CSS. Fue desarrollada por Semtech y se implementa en capa física de la arquitectura de red, lo que permite que LoRa se adapte a conexiones robustas.

La modulación CSS o Chirp Spread Spectrum es una técnica de modulación que utiliza pulsos chirp modulados en frecuencia lineal de banda ancha para codificar información. En este tipo de técnicas de modulación de espectro ensanchado, la señal se transmite en ráfagas, saltando entre las frecuencias de una secuencia pseudoaleatoria.

Un chirp es un tono en el cual la frecuencia se incrementa (up-chirp) o decrecienta (down-chirp) con el tiempo, como se muestra en la figura 10. Su ancho de banda es equivalente al ancho de banda espectral de la señal. Las señales equivalentes a estos tonos se muestran en la figura 11.

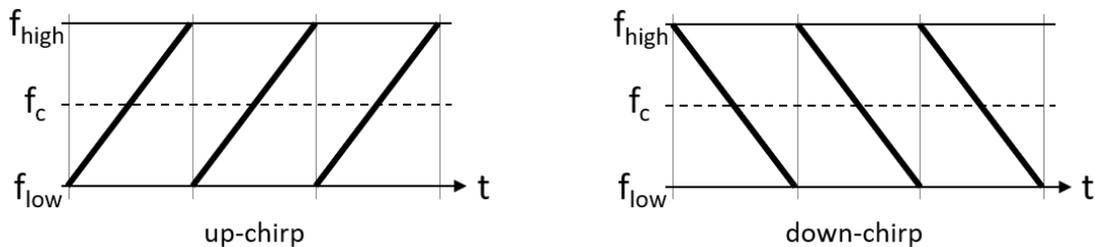


Figura 10. Pulsos up-chirp y down-chirp.

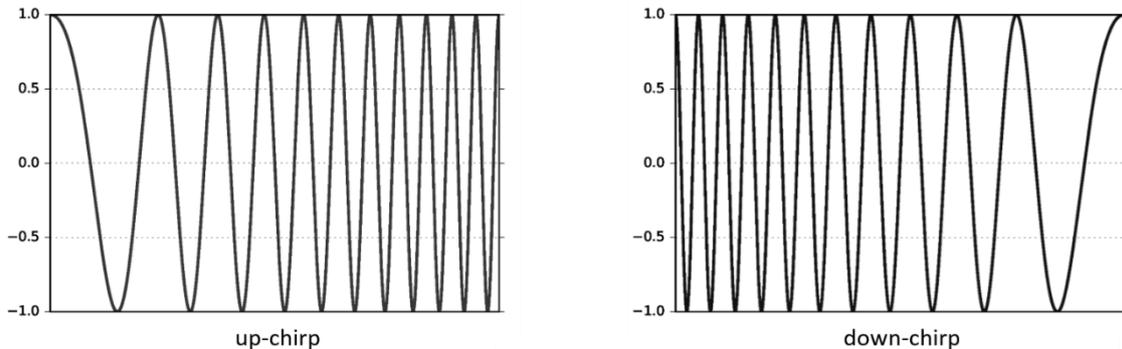


Figura 11. Señales equivalentes de los pulsos up-chirp y down-chirp.

El ensanchamiento del espectro de la modulación LoRa se obtiene generando estos tonos chirp que varían continuamente en frecuencia. Una ventaja de esto es que los offsets de tiempo y de frecuencia entre el transmisor y el receptor son equivalentes, lo que reduce la complejidad de diseño del receptor.

La señal se fragmenta y es modulada en la señal chirp. A partir de las siguientes ecuaciones se define la tasa de bit (2), el periodo de símbolo (3), la tasa de símbolo (4) y la tasa de chirp (5).

$$R_b(\text{bits/s}) = SF \frac{1}{\left(\frac{2^{SF}}{BW}\right)} \quad (2)$$

$$T_s(s) = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (3)$$

$$R_s(\text{símbolos/s}) = \frac{1}{T_s} = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (4)$$

$$R_c(\text{chips/s}) = 2^{SF} \cdot R_s \quad (5)$$

Siendo SF el factor de ensanchamiento y BW el ancho de banda. Teniendo en cuenta la tasa de codificación definida anteriormente en la ecuación (2), la tasa de bits queda reescrita según la ecuación (6).

$$R_b(\text{bits/s}) = SF \frac{\left(\frac{4}{4+CR}\right)}{\left(\frac{2^{SF}}{BW}\right)} \quad (6)$$

Un ejemplo de señal modulada utilizando LoRa se muestra en la figura 12. En dicha figura se pueden ver cuatro pulsos up-chirp iniciales correspondientes a cuatro símbolos de preámbulo, seguidos de dos pulsos down-chirp correspondientes a dos símbolos de sincronización. Este tipo de símbolos se va a detallar posteriormente. Finalmente aparecen cuatro símbolos de datos cuyos pulsos varían en función del factor de ensanchamiento utilizado.

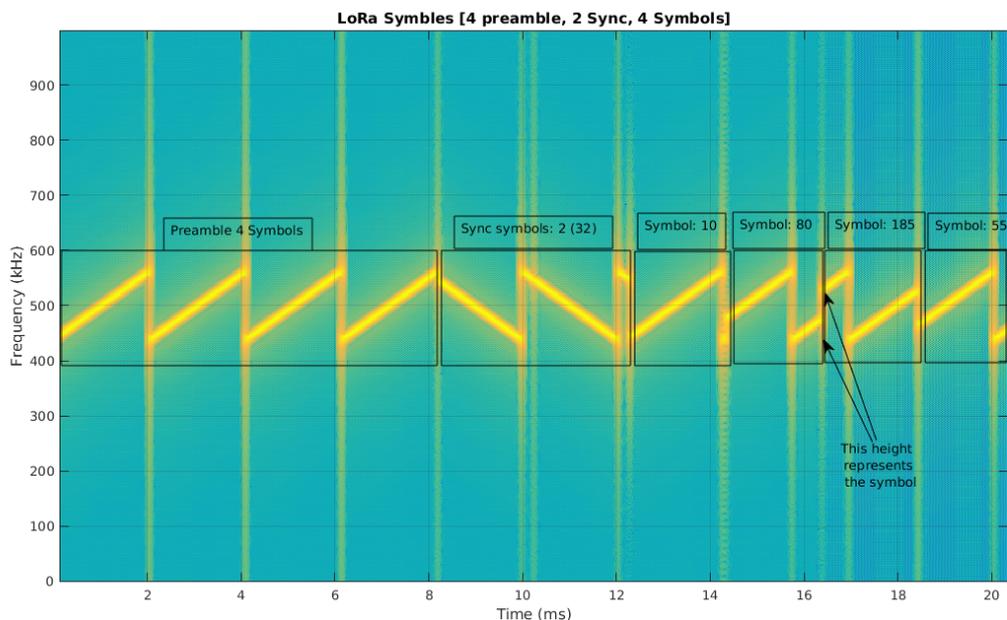


Figura 12. Ejemplo de señal modulada con LoRa.

Concretamente, el ejemplo de la figura anterior corresponde a un factor de ensanchamiento $SF = 8$, lo que significa que cada símbolo transmite 8 bits (0 – 255). Cada pulso chirp quedará dividido en 256 pasos, y su frecuencia inicial representará el símbolo.

6.1.4 Propiedades de la modulación LoRa

Semtech, como propietaria de LoRa, tiene documentadas sus principales propiedades (Semtech, 2015) las cuales quedan detalladas a continuación:

- Ancho de banda escalable

LoRa es escalable tanto en ancho de banda como en frecuencia, y puede ser utilizada en aplicaciones de salto de frecuencia de banda estrecha y en aplicaciones de secuencia directa de banda ancha, adaptándose fácilmente a ambos modos de operación a través de su configuración.

- Envoltente constante

Similar a la modulación FSK, LoRa tiene un esquema de modulación de envoltente constante, lo que significa que las mismas etapas de amplificación de alta eficiencia, bajo consumo y bajo coste pueden ser reutilizadas sin modificaciones, manteniendo el mismo presupuesto de enlace con una menor potencia de transmisión.

- Alta robustez

A causa de su alto producto BT ($BT > 1$) y su naturaleza asíncrona, la señal LoRa es muy resistente a mecanismos de interferencia dentro y fuera de la banda.

- Resistente al desvanecimiento y al multicamino

El pulso chirp de banda ancha ofrece inmunidad al multicamino y al desvanecimiento, siendo ideal para entornos urbanos y suburbanos.

- Resistente al efecto Doppler

El efecto Doppler causa un ligero desplazamiento en frecuencia en la señal LoRa, lo cual introduce un pequeño desplazamiento considerado insignificante en el eje de tiempos de la señal en banda base. A causa de esta tolerancia, se mitiga el requisito de tolerancia estricta de las fuentes de reloj de referencia.

- Capacidad de largo alcance

Dada una potencia de salida y un rendimiento fijos, el presupuesto de enlace de LoRa mejora respecto a la modulación FSK. Teniendo en cuenta, además, las propiedades de alta robustez y de resistencia al desvanecimiento y al multicamino, el presupuesto de enlace se cuadruplica.

- Capacidad de red mejorada

La modulación LoRa emplea factores de ensanchamiento ortogonales que habilitan la transmisión de múltiples señales al mismo tiempo y en el mismo canal sin degradar la sensibilidad del receptor.

- Localización

LoRa tiene la capacidad de distinguir linealmente entre errores de frecuencia y de tiempo, lo que la hace ideal para aplicaciones de localización.

El principio de aumentar el ancho de banda de la señal deseada para transmitir datos sin errores a una distancia mayor es un principio fundamental de las comunicaciones de espectro ensanchado y puede visualizarse comparando la sensibilidad de LoRa con modulaciones similares. Dicha comparativa se muestra en la figura 13. En ella podemos ver la sensibilidad de un receptor LoRa y la sensibilidad de un transceptor FSK convencional. En la gráfica también se muestra el ruido de fondo absoluto o potencia de ruido, y una aproximación en la banda sub-GHz, donde transmite LoRa, del ruido de fondo. Se puede comprobar como LoRa tiene la capacidad de captar señales con un nivel de potencia inferior al ruido de fondo.

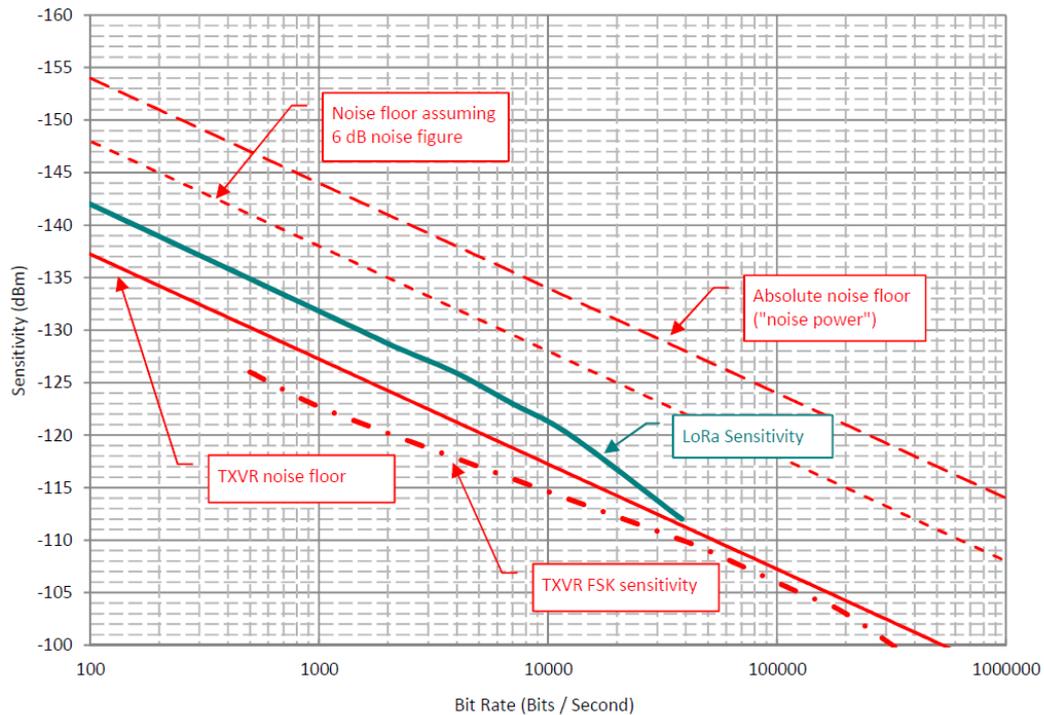


Figura 13. Comparativa de la sensibilidad de un receptor LoRa y FSK convencional (fte. Semtech).

La sensibilidad de LoRa a temperatura ambiente es definida por el desarrollador (Semtech, 2013) en la ecuación (7) donde el primer término constante es causa del ruido térmico en 1 Hz de ancho de banda, BW es el ancho de banda, NF el ruido de fondo y SNR la relación señal ruido.

$$Sens = -174 + 10 \log_{10} BW + NF + SNR \quad (7)$$

Los valores concretos de sensibilidad de LoRa para cada factor de ensanchamiento y cada ancho de banda regulado en Europa se muestran en la tabla 9 y han sido calculados utilizando a partir de un software denominado LoRa Calculator, proporcionado por Semtech a través de su web.

Factor de ensanchamiento	Sensibilidad (dBm)	
	BW = 125 kHz	BW = 250 kHz
7	-124,5	-121,5
8	-127	-124
9	-129,5	-126,5
10	-132	-129
11	-134,5	-131,5
12	-137	-134

Tabla 9. Valores de sensibilidad de LoRa.

6.1.5 Estructura del paquete LoRa

El último aspecto que vamos a analizar sobre la capa física LoRa es la estructura de los paquetes. En la figura 14 se observa la composición de dicha estructura en la que se puede observar que es dependiente de varios parámetros vistos anteriormente, y que está sujeta a la regulación de LoRa Alliance.

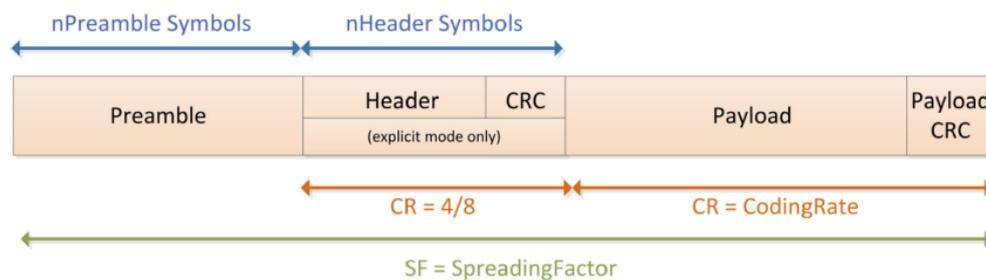


Figura 14. Estructura de un paquete LoRa

La primera secuencia del paquete corresponde a la secuencia de preámbulo, y es común en todas las configuraciones. Su duración es definida por la ecuación (8), donde n_{preamble} es el número de símbolos de preámbulo programados, y T_s es el tiempo de símbolo definido anteriormente en la ecuación (3).

$$T_{\text{preamble}} = (n_{\text{preamble}} + 4,25) T_s \quad (8)$$

La especificación de parámetros establece el valor de n_{preamble} en 8 símbolos y una secuencia de sincronización con el valor hexadecimal 0x34 en la banda EU868. En la ecuación (9) queda definido el número de símbolos que forman la cabecera y la carga útil del paquete.

$$\text{payloadSymbNb} = 8 + \max \left(\text{ceil} \left(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16 - 20H}{4(SF - 2DE)} \right) (CR + 4), 0 \right) \quad (9)$$

Siendo PL el número de bytes de carga útil, SF el factor de ensanchamiento, H la habilitación de la cabecera (0 si está habilitada, 1 si está deshabilitada), DE la optimización de baja velocidad de datos (1 si está habilitada, 0 si está deshabilitada), y CR es la tasa de codificación. A partir de esta última se define en la ecuación (10) el tiempo de carga útil. Finalmente se define el tiempo en el aire o tiempo de envío del paquete en la ecuación (11) como la suma de los tiempos de carga útil y de preámbulo.

$$T_{payload} = payloadSymbNb \cdot T_s \quad (10)$$

$$T_{packet} = T_{payload} \cdot T_{preamble} \quad (11)$$

6.2 Características generales de LoRaWAN

La especificación de red LoRaWAN define los aspectos principalmente influyentes a la hora de determinar el consumo de las baterías de los nodos, la capacidad de la red, la calidad del servicio, la seguridad y las distintas aplicaciones servidas por la red (LoRa Alliance, 2015).

6.2.1 Arquitectura del sistema

En la actualidad, gran parte de las redes desplegadas son de tipo malla. En ellas, los nodos finales reenvían información de otros nodos para incrementar el rango de las comunicaciones y el tamaño de la célula de la red. Este incremento añade complejidad y reduce la capacidad de la red a la par que aumenta el consumo de las baterías a medida que los nodos reciben y reenvían información que es irrelevante para ellos. Frente a estas desventajas que presenta la topología de malla, las redes LoRaWAN utilizan una topología tipo estrella, mediante la cual obtienen menor consumo de las baterías, logrando una conectividad de largo alcance.

En una red LoRaWAN, los nodos no quedan asociados a una puerta de enlace determinada, por lo que los datos transmitidos por cada nodo pueden ser recibidos por múltiples puertas de enlace. Estas reenviarán los paquetes recibidos a la nube a través de un backhaul.

La inteligencia y la complejidad es puesta en el servidor de red, el cual gestiona la red y filtra los paquetes redundantes, realiza comprobaciones de seguridad, programa los acuses de recibo a través de la puerta de enlace óptima y gestiona la velocidad de datos adaptativa.

6.2.2 Duración de la batería

Las redes LoRaWAN se componen de nodos asíncronos que se comunican cuando tienen datos preparados para su envío a través de eventos programados. Este comportamiento es propio del protocolo de comunicación Aloha y difiere de una red tipo malla o una red síncrona como la red móvil en la cual los nodos tienen que despertar con una determinada frecuencia para sincronizar con la red y comprobar los mensajes. Este funcionamiento es el responsable del consumo de una parte de energía considerable, siendo la principal fuente de reducción de la vida de las baterías.

6.2.3 Capacidad de la red

La capacidad de red se ve afectada por una serie de factores críticos, como el número de canales concurrentes, la velocidad de datos, la carga útil o la transmisión de los nodos.

Para que una red de tipo estrella como LoRaWAN sea viable en largas distancias, sus puertas de enlace deben poseer alta capacidad para recibir mensajes desde un gran volumen de nodos. Esta capacidad se consigue utilizando ADR (Adaptative Data Rate), velocidad de datos adaptativa, y utilizando un transceptor multimódem y multicanal en la puerta de enlace, para poder recibir de manera simultánea mensajes en múltiples canales.

Al ser LoRa una técnica de modulación de espectro ensanchado, las señales con distinto factor de ensanchamiento son ortogonales entre sí. Un cambio en el factor de ensanchamiento implica a su vez un cambio en la velocidad de datos efectiva. La puerta de enlace toma ventaja de esto para poder recibir múltiples velocidades de datos en el mismo canal de forma simultánea, de tal modo que un nodo cercano a la puerta de enlace usará la velocidad de datos más baja para no ocupar el espectro más de lo necesario. El incremento de la velocidad de datos implica un tiempo de envío menor, abriendo la posibilidad de transmitir a otros nodos. La velocidad de dato adaptativa (ADR) también optimiza la batería de los nodos, precisando para su funcionamiento unos enlaces de subida y bajada simétricos, con suficiente capacidad en el enlace de bajada.

Todas estas características establecidas habilitan una red LoRaWAN escalable de alta capacidad, pudiendo ser desplegada con una mínima cantidad de infraestructura, y extendida posteriormente añadiendo nuevas puertas de enlace, incrementando la velocidad de datos y reduciendo la cantidad de tiempo en escucha de las puertas de enlace.

6.2.4 Clases de dispositivos

Los dispositivos finales se localizan en los nodos de la red, sirven a las diferentes aplicaciones y tienen distintos requerimientos. A fin de optimizar varios perfiles de aplicación final, LoRaWAN utiliza distintas clases de dispositivos cuyos parámetros críticos son la vida de las baterías y la latencia en el enlace de bajada. La figura 15 muestra una gráfica comparativa de las clases de dispositivos existentes.

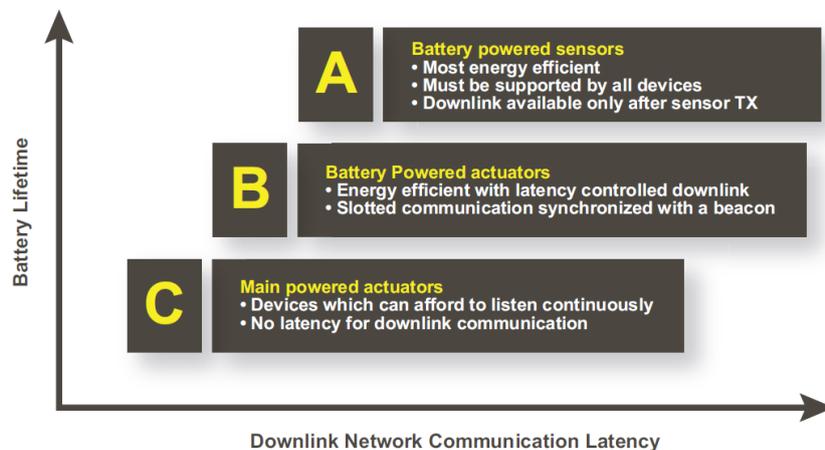


Figura 15. Clases de dispositivos de la red LoRaWAN (fte. LoRa Alliance).

Los dispositivos de clase A son dispositivos finales con comunicación bidireccional en los que cada transmisión es seguida por dos mensajes de recepción, como muestra la figura 16. La ranura de transmisión es programada por el nodo basándose en su propia necesidad de comunicación, con una pequeña variación basada en un tiempo aleatorio. Esta clase de dispositivos son los que presentan un consumo menor de potencia y una mayor latencia. Son idóneos para aplicaciones que solamente requieren recepción de datos en un corto periodo de tiempo.

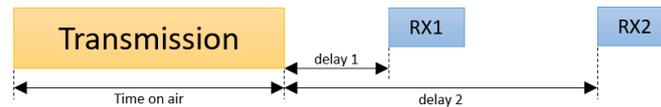


Figura 16. Ranura de recepción de un dispositivo de clase A.

Los dispositivos de clase B corresponden a dispositivos bidireccionales con ranuras de recepción programadas como se muestra en la figura 17. Frente a los dispositivos de clase A, estos añaden a su funcionalidad ventanas de recepción adicionales a determinadas horas programadas, que se sincronizan en tiempo a través de una baliza recibida desde la puerta de enlace, lo que permite al servidor conocer cuando el nodo está escuchando. La latencia disminuye frente a los dispositivos de clase A, pero el consumo de potencia aumenta.

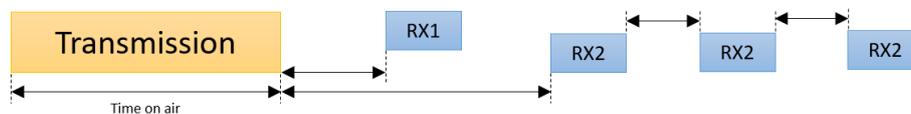


Figura 17. Ranura de recepción de un dispositivo de clase B.

Por último, los dispositivos de clase C son dispositivos bidireccionales con ventanas de recepción en escucha permanentemente que solo se cierran cuando el dispositivo transmite, como se muestra en la figura 18. Estos dispositivos están pensados para actuadores, de modo que su latencia debe ser nula. Sin embargo, esto provoca que el consumo sea mucho mayor que las anteriores clases de dispositivos.

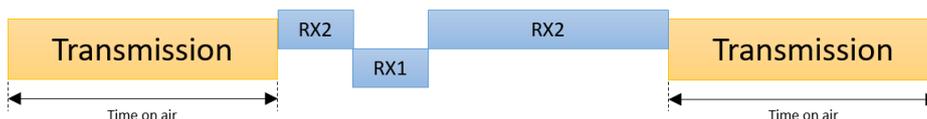


Figura 18. Ranura de recepción de un dispositivo de clase C.



6.2.5 Seguridad

Hoy en día, la seguridad es una pieza fundamental de los sistemas de comunicación, y es de vital importancia incorporarla. Las redes LoRaWAN utilizan dos capas de seguridad, una para la red y otra para la aplicación. La capa de seguridad de red asegura la autenticidad del nodo en la red, mientras que la capa de seguridad de la aplicación garantiza que el operador de red no tiene acceso a los datos de la aplicación del usuario final. Se utiliza el cifrado AES con intercambio de claves, utilizando un identificador IEEE EUI64.

LoRaWAN define en su especificación tres claves de seguridad de 128 bits distintas. La primera de ellas es la clave de aplicación AppKey, que solamente es conocida por el dispositivo y por la aplicación y que se usa en el proceso de activación o join que da lugar cuando un dispositivo se une a la red. En ese proceso de join se generan las dos claves restantes, que son la clave de sesión de aplicación AppSKey, y la clave de sesión de red NwkSKey. Si en el proceso de activación se usa ABP (Activation by Personalization), las claves serán las mismas hasta que sean cambiadas por el usuario, mientras que si se usa OTAA (Over-the-air Activation), serán regeneradas en cada activación.

La clave de sesión de red NwkSKey es usada para la interacción entre el nodo y el servidor de red y se encarga de verificar la validez de los mensajes, mientras que la clave de sesión de aplicación AppSKey es usada para encriptar y desencriptar la carga útil.

Capítulo 7. Planificación de la red

Hasta el momento se han visto aspectos teóricos relacionados con la tecnología que ha sido usada por este proyecto. En este capítulo se van a presentar los aspectos principales relacionados con lo que sería la implantación real de una red LoRaWAN. En primer lugar, se va a detallar la finalidad de la red y los componentes que la forman. A continuación, se verán los principales aspectos de la red que afectan directamente a la simulación de los distintos modelados. Entre dichos aspectos se encuentra la definición de los parámetros de análisis que se tendrán en cuenta a la hora de dar validez a los resultados obtenidos en las correspondientes simulaciones y el análisis del modelo de propagación de la señal, considerado uno de los puntos más críticos de cara a un posible diseño para una implantación real. Finalmente se van a presentar el entorno de simulación propuesto y sus limitaciones a la hora de abordar las simulaciones, y se van a definir los distintos modelados de red que van a ser simulados.

7.1 Destino de la red

La finalidad del presente proyecto es la conservación preventiva del patrimonio cultural a través del estudio de la viabilidad de un sistema de monitorización del patrimonio cultural de un lugar determinado. Aunque para este estudio se ha considerado un entorno ficticio, se va a ejemplificar el destino de la red sobre un entorno real como el campus de Vera de la Universitat Politècnica de València.

La Universitat Politècnica de Valencia cuenta con un fondo de arte (UPV, s. f.) inaugurado en la década de los 90 y en constante crecimiento desde entonces, contando en la actualidad con más de 3.000 obras repartidas por los tres campus que la forman, y constituida en cinco colecciones: pintura contemporánea, escultura contemporánea, fotografía contemporánea, obra gráfica y el campus escultórico al aire libre.

El diseño de la red LoRaWAN está orientado a patrimonio cultural ubicado en zonas de interior. El objetivo es monitorizar el entorno en el que se encuentran las obras y conocer su exposición a agentes externos, de modo que pueda agilizarse los procedimientos de prevención, mantenimiento o reparación. La evaluación del entorno está determinada por la medida de las tres variables de entorno que afectan directamente a las obras, la temperatura, la humedad relativa y la luminosidad incidente. Con este objetivo marcado, se van a abordar posteriormente las principales limitaciones de la red: su capacidad y el consumo de los nodos.

7.2 Componentes de la red

7.2.1 Nodos de la red

El siguiente punto hace referencia a un posible diseño de los nodos que van a servir a la red. Este diseño ha sido realizado por un compañero de esta Universidad (Jaima Laborda, 2018). La figura 19 muestra el diseño físico del nodo implementado, que actualmente es un prototipo compuesto por un kit de desarrollo LRWAN1 y una tarjeta de sensores denominada LoRa Sensor Shield, la cual se diseñó exclusivamente para este prototipo, con el formato estándar de Arduino.

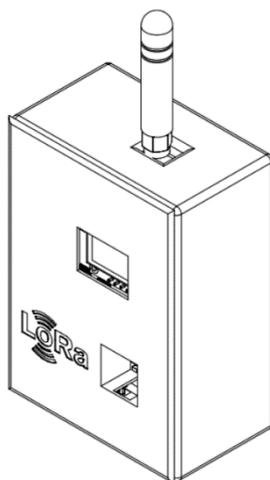


Figura 19. Nodo LoRa implementado.

La tarjeta LoRa Sensor Shield integra los sensores de temperatura, humedad relativa y luminosidad incidente, mientras que el kit LRWAN1 tiene como principales componentes el microcontrolador STM32L y el transceptor de LoRa SX1276.

7.2.2 Puerta de enlace de la red

La puerta de enlace o estación base de la red LoRaWAN es la encargada de recoger los paquetes LoRa enviados por los nodos, procesarlos y enviarlos a la nube. Una sola puerta de enlace tiene capacidad suficiente para cubrir una superficie 500.000 m² como, por ejemplo, el campus de Vera. Sin embargo, habrá que tener en cuenta numerosas limitaciones.

Los componentes principales de la puerta de enlace son el punto de acceso que servirá los datos a la nube y la antena de recepción de los paquetes LoRa. Actualmente la Universitat Politècnica de València cuenta con una antena ubicada en la Ciudad Politécnica de la Innovación, destinada a una posible implantación de una red LoRaWAN. Esta antena es un modelo omnidireccional de exterior denominado Barracuda 868MHz 8 dBi desarrollado por Taoglas. La tabla 10 refleja sus características eléctricas más relevantes.

Características eléctricas	
Banda	860 – 870 MHz
Ganancia	8 dBi
Polarización	Vertical
Impedancia	50 ohms
Máx. potencia de entrada	50 watts
VSWR	1.5:1

Tabla 10. Principales características de la antena de recepción.

7.3 Principales objetivos de la red

La viabilidad de una red queda determinada por los objetivos marcados para su implantación, los cuales son definidos a partir de las propiedades de la red en cuestión. A su vez, estas propiedades definen los valores de los parámetros principales que han de ser analizados para poder verificar la calidad de resultados.

Los principales objetivos de la implantación de una red destinada a la monitorización de parte del patrimonio cultural del campus de Vera son la escalabilidad de la red y su consumo, de modo que la red pueda dar soporte al crecimiento del patrimonio monitorizado afectando mínimamente al consumo global de la red.

7.3.1 Escalabilidad

La alta capacidad de LoRa permite disponer de redes escalables, teniendo en cuenta que existen limitaciones a consecuencia de diversos factores que afectan a esta escalabilidad y que se traducen en la superposición de paquetes durante las transmisiones. A consecuencia de esta superposición, puede tener lugar la aparición de colisiones y la pérdida de paquetes.

El solapamiento de dos paquetes de transmisión tiene lugar cuando sus intervalos temporales de recepción son coincidentes. Analíticamente, la superposición se da cuando el valor absoluto de la diferencia del valor medio de sus intervalos de recepción temporal (T_i, T_f) tiene un valor menor que la suma de la longitud media de ambos paquetes, tal y como se refleja en la ecuación (12).

$$Overlap(x, y) \rightarrow \left| \frac{T_{i_x} + T_{f_x}}{2} - \frac{T_{i_y} + T_{f_y}}{2} \right| < \frac{(T_{f_x} - T_{i_x}) + (T_{f_y} - T_{i_y})}{2} \quad (12)$$

La superposición temporal de dos paquetes de transmisión puede generar una colisión entre ambos paquetes y la consecuente pérdida de uno o ambos. Para que tenga lugar esta casuística, se han de cumplir dos situaciones. En primer lugar, el canal utilizado para la transmisión de ambos paquetes debe ser el mismo, lo cual significa que ambos paquetes están empleando la misma frecuencia de transmisión. En segundo lugar, ambos paquetes deben ser transmitidos con el mismo factor de ensanchamiento. El cumplimiento de ambas situaciones supondrá una colisión entre los paquetes implicados.

La colisión entre dos paquetes va a suponer la pérdida de la información contenida por uno de ellos, y en algunos casos la información contenida en ambos paquetes. La señal más débil a nivel de potencia quedará enmascarada por la señal dominante y se perderá su información. En ciertos casos, la diferencia de potencia entre ambas es demasiado pequeña, y ninguna de las dos señales puede enmascarar a la otra, por lo que se produce la pérdida de ambos paquetes.

La evaluación de la escalabilidad de una red LoRaWAN se va a realizar mediante el análisis de la tasa de extracción de datos o DER (Data Extraction Rate), definida en la ecuación (13) como la relación entre la diferencia del número de paquetes enviados y las colisiones producidas, y el número total de paquetes enviados.

$$DER = \frac{\text{Paquetes Enviados} - \text{Colisiones}}{\text{Paquetes Enviados}} \quad (13)$$

La ecuación anterior no tiene en cuenta los paquetes cuya información no se pierde a causa de las colisiones, sino que se pierde debido a que la potencia de la señal es menor que la sensibilidad del receptor. Por este motivo, la ecuación (14) define un segundo método para analizar el DER, calculado en este caso como la relación entre los paquetes recibidos por el receptor y los paquetes enviados por los nodos de la red.

$$DER = \frac{\text{Paquetes Recibidos}}{\text{Paquetes Enviados}} \quad (14)$$

Existen entornos de simulación donde la ubicación de los nodos está condicionada por la distancia máxima a la cual un nodo puede transmitir un paquete cuya potencia en el receptor esté, siempre, por encima de la sensibilidad en el peor de los casos. Esta distancia máxima está marcada por el modelo de propagación de la señal, que se verá posteriormente. En estos entornos de simulación mencionados, el valor de la tasa de extracción de datos será el mismo para ambos métodos, pues los paquetes perdidos corresponderán, únicamente, a colisiones.

7.3.2 Consumo de energía

LoRaWAN es una de las tecnologías emergentes para redes de baja potencia, lo cual significa que el consumo de energía de este tipo de red es un aspecto determinante a la hora de evaluar cualquier posible implantación de dicha tecnología. El análisis de este consumo de energía se define como la energía gastada por la red para la extracción de la información recibida correctamente.

La principal fuente de consumo de energía de la red son los nodos desplegados, encargados de la monitorización del patrimonio. El consumo de energía de cada transmisión varía en función de la potencia de transmisión y de su duración, que a su vez depende del ancho de banda, del factor de ensanchamiento y de la tasa de codificación de la transmisión.

Los nodos son dispositivos inalámbricos, con lo cual están alimentados por baterías. La duración de estas baterías es una de las características principales de la especificación de red LoRaWAN, siendo su unidad de medida años. A causa de esto, se considera de vital importancia la elección del modelo de batería, así como la optimización de las transmisiones.

Para calcular la durabilidad de las baterías de los nodos de la red es necesario, en primer lugar, conocer algunos de los parámetros característicos de la batería en cuestión, como su capacidad nominal (Ah), su voltaje nominal (V) y su energía nominal (Wh). Por otro lado, es necesario conocer el valor medio de energía (J) de cada nodo y calcular su potencia (W) a partir del tiempo de simulación de la red. La ecuación (15) calcula este valor de potencia del nodo.

$$P_{nodo}(W) = \frac{E_{red}/N_n}{T_s(s)} \quad (15)$$

$E_{red}(J)$ se corresponde con la energía total consumida por la red en un determinado intervalo de tiempo, N_n es el número de nodos que constituyen la red, y $T_s(s)$ es el intervalo de tiempo en el cual se ha obtenido el valor de energía de la red. La ecuación (16) define finalmente la duración, en años, de la batería asociada a un nodo, donde $E_{nom_{bat}}$ se corresponde con el valor de energía nominal de la batería utilizada.

$$Duracion \text{ (años)} = \frac{E_{nom_{bat}}}{P_{nodo}} \frac{1}{24 \times 365} \quad (16)$$

A partir de los valores de energía que se van a obtener posteriormente a través de las simulaciones, se decidirá la batería que va a ser utilizada, buscando un equilibrio entre la duración y el coste de dichas baterías.

7.4 Modelo de propagación de la señal

A continuación, vamos a estudiar el modelo de propagación que va a ser usado. Este parámetro se ha considerado potencialmente crítico dado que varía en función de la densidad del entorno. Para poder validar una implementación real de red se deberá conocer primero el entorno y el comportamiento de la señal en dicho entorno.

Para que el paquete sea recibido correctamente por el receptor, la potencia recibida por el mismo debe ser mayor que la sensibilidad que se ha especificado en la ecuación (7) en el capítulo 6. Dicha potencia recibida viene dada por la ecuación (17).

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx} - L_{pl} + G_{rx} - L_{rx} \quad (17)$$

Siendo P_{tx} , la potencia transmitida (un máximo de 14 dBm según la especificación LoRaWAN), G_{tx} la ganancia del nodo en dB, L_{tx} las pérdidas del nodo en dB, L_{pl} las pérdidas del trayecto en dB, G_{rx} la ganancia de la antena en recepción en dB y L_{rx} las pérdidas del receptor en dB.

De cara a la simulación, al ser un entorno ficticio, no se tendrán en cuenta las pérdidas de los componentes (L_{tx} y L_{rx}) ni la ganancia del transmisor (G_{tx}).

7.4.1 Log-distance path loss model

Ante la existencia de múltiples modelos de propagación de la señal, se ha escogido el modelo que han empleados otros estudios relacionados con la configuración de redes LoRaWAN (Petajarvi et al., 2015). Con este modelo de propagación se define las pérdidas del trayecto en la ecuación (18).

$$L_{pl} = L_{pl}(d_0) + 10n \log \frac{d}{d_0} + X_\sigma \quad (18)$$

Donde $L_{pl}(d_0)$ son las pérdidas de propagación a una distancia de referencia d_0 , n es el exponente de pérdidas y X_σ es la distribución normal de media 0 y varianza σ^2 . Este último valor tampoco se va a tener en cuenta de cara a la simulación. Finalmente, la ecuación (19) define la potencia de recepción que vamos a tener en cuenta en la simulación.

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{rx} + L_{pl}(d_0) + 10n \log \frac{d}{d_0} + X_\sigma \quad (19)$$

7.4.2 Parámetros del modelo de propagación

En este apartado se van a especificar los parámetros de la ecuación (7.8) que quedarán definidos posteriormente en la simulación, obtenidos de estudios similares que calculan el modelo de propagación para entornos urbanos (M. Bor et al., 2016) y para entornos suburbanos (Petajarvi et al., 2015). La tabla 11 refleja estos parámetros. Se ha considerado un entorno ficticio con una densidad cercana a un entorno suburbano, por lo que se tendrán en cuenta los valores.

Parámetros	Entorno urbano	Entorno suburbano
$d_0(m)$	40	1000
$L_{pld_0}(dB)$	127,41	128,95
n	2,08	2,32
σ	3,57	7,8

Tabla 11. Parámetros del modelo de propagación definidos en estudios referentes.

7.5 Entorno de simulación

A continuación, vamos a detallar el entorno de simulación que se ha utilizado para llevar a cabo las simulaciones de los distintos modelados de red, junto con las limitaciones encontradas en dicho simulador.

7.5.1 OMNeT++

OMNeT++ es un framework de simulación modular de eventos discretos, usado habitualmente para modelar el tráfico de redes de comunicación y de cualquier sistema que esté basado en eventos discretos. Proporciona una arquitectura de componentes programados en C++ y ensamblados en componentes más complejos mediante el lenguaje de alto nivel NED (Network Description), que describe la topología de la red (OMNeT++, s.f.) en un entorno de desarrollo basado en Eclipse.

OMNeT++ utiliza una librería de modelos de código abierto denominada INET, la cual es considerada su biblioteca estándar por ser la más usada. Existen diversos framework de simulación que toman esta librería como base y la extienden hacia otras direcciones específicas, tales como redes vehiculares, redes LTE o redes LoRaWAN entre otras, siendo FLoRa uno de estos frameworks mencionados.

7.5.2 FLoRa

FLoRa es un simulador de redes LoRaWAN desarrollado por la Universidad de Aalto, Finlandia (FLoRa, s.f.) para el estudio de la configuración adaptativa de este tipo de redes (M. Slabicki et al., 2018), cuyo enfoque muestra objetivos comunes con este proyecto.

FLoRa implementa módulos para los nodos, las puertas de enlace y el servidor de red, necesarios para la creación de una red LoRaWAN. La lógica de dicha red puede implementarse como un módulo independiente conectado al servidor de red, y tanto este servidor de red como los nodos tienen la posibilidad de gestionar dinámicamente sus parámetros de comunicación a través del ADR. En la figura 20 se puede observar un ejemplo de la topología de red LoRaWAN de FLoRa, donde aparecen todos los componentes de red necesarios para la realización de una simulación extremo a extremo.

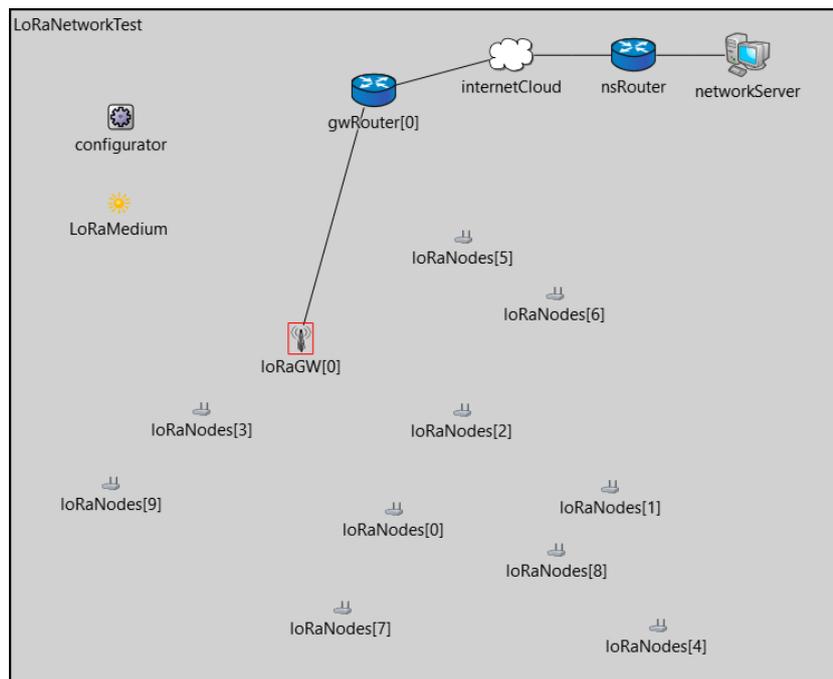


Figura 20. Topología de red LoRaWAN implementada en FLoRa.

FLoRa cuenta con un modelo preciso de la capa física de LoRa que incluye medidas de colisión y captura de efectos, y genera estadísticas de consumo de la red, por lo que ha sido considerado la mejor opción para llevar a cabo las simulaciones del proyecto.

7.5.3 *Limitaciones de FLoRa*

FLoRa es un framework desarrollado para propósitos de investigación, y por ello su funcionalidad está limitada en ciertos aspectos.

El primero de estos aspectos es el proceso de activación o join. La versión actual de FLoRa implementa el join utilizando OTAA y considerando que la activación es correcta siempre, por lo tanto, el proceso de autenticación no es real. Sin embargo, se tienen en cuenta los tiempos de envío de esta pseudo autenticación para tener en cuenta los tiempos de envío y el consumo de los nodos.

El segundo aspecto es el más importante. FLoRa tiene implementado actualmente un solo canal de comunicación, por lo que todos los nodos de la red tienen la misma frecuencia de transmisión, siendo un factor muy limitante para poder aprovechar las capacidades que ofrecen este tipo de redes. Posteriormente se detalla cómo se ha abordado esta limitación.

7.5.4 *LoRaSim*

Además de FLoRa, un segundo simulador fue analizado para estudiar su uso en el proyecto. Este simulador llamado LoRaSim es un simulador de eventos discretos basado en SimPy, desarrollado por la Universidad de Lancaster, Reino Unido, para la simulación de colisiones y el análisis de la escalabilidad de las redes LoRaWAN (LoRaSim, s.f.).

Su funcionalidad está limitada debido a que las simulaciones no constituyen un enlace completo, es decir, solo tiene en cuenta datos de las comunicaciones entre los nodos y la puerta de enlace, y carece de optimización adaptativa de los parámetros de transmisión, una de las características más ventajosas de LoRa, por lo que las simulaciones con este entorno se han descartado.

7.6 **Configuración del entorno de simulación**

Previamente a detallar los distintos modelados de la red, se va a describir la configuración básica del entorno, es decir, los aspectos comunes a todos los modelados de red que han sido simulados.

7.6.1 *Características físicas del entorno*

Las simulaciones se van a llevar a cabo sobre un entorno no definido bidimensional, ya que se necesitarían características específicas de un entorno real para poder realizar las simulaciones en tal entorno. Se ha supuesto un entorno de 750.000 m², con unas dimensiones de 1.500 x 500 metros, sobre el cual se desplegarán todos los componentes físicos necesarios, tanto los nodos como la antena y el punto de acceso de las puertas de enlace.

7.6.2 *Caracterización del consumo*

La caracterización del consumo viene determinada en un archivo .xml, que contiene los valores de tensión de alimentación de los nodos y los valores de corriente para cada estado y cada potencia de transmisión. FLoRa contiene por defecto los valores correspondientes al chip SX1272/73.

7.6.3 Caracterización de los canales LoRa

La implementación de un solo canal de comunicación en FLoRa limitaba tanto la funcionalidad de cara a la simulación como el número de modelados de red, por lo que se ha modificado el modelo correspondiente que se encarga de inicializar los parámetros de comunicación de cada nodo.

El número de nodos varía para cada modelado simulado, lo que dificulta asignar equitativamente dichos nodos a un canal de comunicación determinado. Frente a esto, se ha optado por asignar aleatoriamente a cada nodo, uno de los canales de comunicación que se encuentre activo en su simulación.

7.6.4 Descripción de la red

Los modelados que se van a definir utilizan la misma topología y a partir de ella varían algunos parámetros de comunicación y componentes. Esto quiere decir que solo es necesario definir un fichero de descripción de red. En la figura 21 se muestra la visualización gráfica del archivo NED que describe la topología de la red usada, y se anexa su código asociado al final del documento. Se puede observar que solo se muestra un nodo, una puerta de enlace y un punto de acceso. El número de estos componentes se determinará en el fichero de configuración.

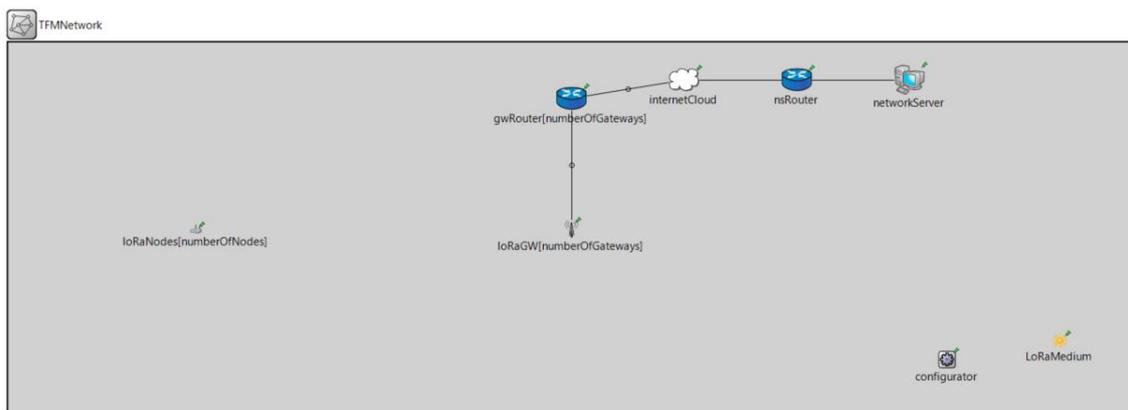


Figura 21. Configuración de la topología de la red implementada.

7.6.5 Configuración de la red

La configuración de la red descrita se define en el correspondiente fichero de configuración inicial a partir del cual se construye la topología de red. En este fichero se configuran los parámetros de los componentes de la red. Para este proyecto se define el número de nodos y el número de puertas de enlace, y se determina la localización espacial de estos componentes. También se define el número de canales de comunicación activos, los valores iniciales de los parámetros de transmisión y la caracterización de su consumo de energía.

En lo que respecta a tiempos de simulación, se definen el tiempo total de simulación de la red y el periodo de calentamiento de la red que corresponde a un tiempo de simulación requerido para que la red alcance un estado de estabilidad. Por último, se define el tiempo de envío de paquetes inicial y el intervalo de envío de cada nodo.

La ejecución del fichero de configuración inicial lanza el entorno gráfico Qt sobre el cual se construye la topología de red la figura anterior en base al modelado de red seleccionado.

7.7 Definición de los modelados de red

Por último, en este capítulo se van a definir los tiempos de ejecución de simulación y los distintos modelados de red que se van a simular, cuyos resultados se mostrarán posteriormente.

El periodo de simulación de red suma un total de 10 días, y el periodo de calentamiento o warm-up es de 2 días. Los nodos transmitirán su primer paquete en los primeros 10 segundos del tiempo de simulación y a partir de ese instante transmitirán paquetes cada 60 minutos.

Los parámetros a tener en cuenta para diferenciar los distintos modelados son, en primer lugar, el número de puertas de enlace. Se han modelados redes con una única puerta de enlace y con dos puertas de enlace. La localización espacial de dichos componentes depende de su cantidad. Para el modelado con una única puerta de enlace, esta se localiza en el punto central del entorno, y para el caso de dos puertas de enlace, estas se localizan en puntos equidistantes a lo largo del eje horizontal y en el punto medio del eje vertical. Con este parámetro distinguimos dos modelados de red.

El segundo parámetro que define la distinción entre los modelados es el número de canales de comunicación activos. Aunque por defecto FLoRa solo disponía de un canal activo, tal y como se ha detallado anteriormente, se modificó el componente para poder disponer de más canales de comunicación, por lo que se han modelado redes con 1, 2, 4 y 8 canales de comunicación activos. Por lo tanto, teniendo en cuenta este segundo parámetro, distinguimos un total de ocho modelados de red.

Finalmente, hay que tener en cuenta que cada uno de estos modelados no se corresponde a una única simulación de red, ya que se va a variar el número de nodos desplegados en cada uno de estos modelados. La cantidad de dichos nodos que se va a desplegar varía entre 50 y 300 nodos con un paso de 50, lo que supondrá un total de 6 simulaciones en cada modelado de red. La tabla 12 refleja los parámetros que diferencian cada simulación, sumando un total de 48 simulaciones teniendo en cuenta todas las opciones disponibles.

Parámetros	Valores
Puertas de enlace	1, 2
Canales activos	1, 2, 4, 8
Nodos desplegados	50, 100, 150, 200, 250, 300

Tabla 12. Parámetros variables de simulación.

Capítulo 8. Resultados de la red

En este capítulo se van a presentar los resultados obtenidos en las distintas simulaciones llevadas a cabo con el framework de simulación FLoRa para los modelados de red propuestos. Estos resultados corresponden a los medibles directamente relacionados con los objetivos de la red marcados previamente, la escalabilidad y el bajo consumo de energía o alta durabilidad de las baterías de los nodos de la red. También se van a presentar otros aspectos de la red que han influido en los resultados, como la variación del factor de ensanchamiento de los nodos a causa del ADR o su distribución en los canales de comunicación activos en los casos en los que se hace uso de más de un canal. La tabla 13 refleja la definición de dichos canales dada en el simulador y su correspondiente frecuencia de transmisión.

Canales de transmisión	Frecuencia de transmisión
Canal 1	868,1 MHz
Canal 2	868,3 MHz
Canal 3	868,5 MHz
Canal 4	867,1 MHz
Canal 5	867,3 MHz
Canal 6	867,5 MHz
Canal 7	867,7 MHz
Canal 8	867,9 MHz

Tabla 13. Canales de transmisión definidos en el simulador FLoRa.

Un último punto a tener en cuenta antes de mostrar los resultados es que no se han aplicado técnicas estadísticas a las simulaciones para el cálculo del intervalo de confianza, debido al coste temporal que implicaba. De cara a simular entornos reales, se pretende usar la técnica estadística de las réplicas independientes para obtener valores con un error del 5 % y un nivel de confianza del 95 %.

8.1 Modelados de red con una puerta de enlace

Los modelados de red cuyos resultados se van a detallar en primer lugar, son los que cuentan con una única puerta de enlace. Forman un total de cuatro modelados de red, diferenciados por los canales de comunicación que tienen a su disposición. Teniendo en cuenta la variación de los nodos en cada modelado, se cuenta con un total de 24 simulaciones de red para entornos con una única puerta de enlace. La figura 22 muestra el entorno virtual de la red con la puerta de enlace situada en el punto central del plano, y los nodos, en este caso 50, desplegados aleatoriamente sobre dicho plano.

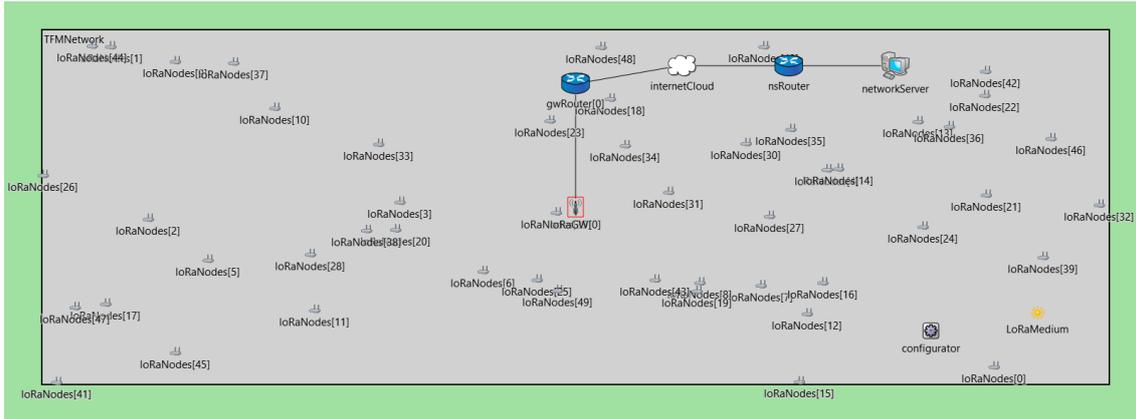


Figura 22. Entorno Qt con la red desplegado para el caso de 1 puerta de enlace y 50 nodos.

8.1.1 Modelado 1: 1 canal de comunicación activo

El primer modelado de red es el más limitante de los ocho modelados de red simulados. La tabla 14 muestra los datos relacionados con la escalabilidad de la red. Estos datos son el total de paquetes enviados por el conjunto de los nodos, el total de paquetes recibidos correctamente por la puerta de enlace de la red y el número de colisiones producidas. A partir de ellos, teniendo en cuenta las ecuaciones (13) y (14) se calcula la tasa de extracción de datos, DER, mostrada también en la tabla.

N.º de nodos	Paquetes enviados	Paquetes recibidos	Colisiones	DER
50	12 000	7 713	3 731	64,23 %
100	24 000	19 923	8 798	58,01 %
150	36 000	16 695	20 021	46,38 %
200	48 000	20 232	29 105	42,15 %
250	60 000	23 423	38 066	39,04 %
300	72 000	22 222	53 731	30,86 %

Tabla 14. DER. Resultados para 1 puerta de enlace y 1 canal de comunicación.

Respecto al consumo de energía de los nodos, la tabla 15 recoge la información de valor máximo, el valor mínimo y el valor medio de consumo de los nodos, teniendo en cuenta que estos valores se corresponden al consumo correspondiente a los 10 días de simulación.

En cuanto a la duración de la batería, se ha tenido en cuenta una batería específica para calcular este valor. Se ha seleccionado un modelo de pila del fabricante SAFT, cuyo catálogo dispone de baterías específicas para componentes relacionados con IoT. Dicho modelo es el LS 14500, que tiene un coste aproximado de 5 €. Sus características eléctricas se muestran en la tabla 16. A partir de ellas se ha calculado la duración media de las baterías, teniendo en cuenta la ecuación (16) vista anteriormente.

N.º de nodos	Consumo máximo (J)	Consumo mínimo (J)	Consumo medio (J)	Duración media (años)
50	78,86	19,44	34	27,15
100	98,59	19,5	36,01	25,64
150	93,11	19,67	42	21,98
200	98,97	19,6	43,41	21,27
250	92,91	19,63	39,8	23,19
300	93,47	19,66	42,27	21,84

Tabla 15. Consumo de energía y estimación de la batería de un nodo para 1 puerta de enlace y 1 canal de comunicación.

Característica eléctrica	
Capacidad nominal	2,6 Ah
Voltaje nominal	3.6 V
Energía nominal	9,36 Wh
Máxima corriente	50 mA

Tabla 16. Características eléctricas de la batería LS 14500.

8.1.2 Modelado 2: 2 canales de comunicación activos

En este segundo modelado ya se cuenta con más de un canal de comunicación, concretamente con dos canales de comunicación activos. La distribución de los nodos sobre ambos canales se realiza de forma aleatoria y se refleja en la tabla 17. Lo ideal es que el reparto de los nodos sobre los canales sea equitativo. La distribución mostrada en esta tabla se aproxima a dicho reparto equitativo.

N.º de nodos	Canal 1	Canal 2
50	48 %	52 %
100	42 %	58 %
150	46,67 %	53,33%
200	49 %	51 %
250	53,6 %	46,4 %
300	51,33 %	48,67 %

Tabla 17. Distribución de los nodos para 1 puerta de enlace y 2 canales de comunicación.

Siguiendo las mismas pautas que en el modelado anterior, se han presentado en la tabla 18 los datos referentes a escalabilidad y en la tabla 19 los datos referentes al consumo de energía y a la duración de las baterías.

N.º de nodos	Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Colisiones	DER
50	12 000	9 340	1 330	77,83 %
100	24 000	15 253	7 331	63,55 %
150	36 000	19 775	15 206	54,93 %
200	48 000	24 062	22 630	50,13 %
250	60 000	27 917	30 991	46,53 %
300	72 000	30 734	41 932	42,69 %

Tabla 18. DER. Resultados para 1 puerta de enlace y 2 canales de comunicación.

Respecto a la escalabilidad, vemos que la tasa de extracción de datos ha aumentado respecto al modelado de un solo canal, y número de colisiones producidas también se ha reducido a causa de esto.

N.º de nodos	Consumo máximo (J)	Consumo mínimo (J)	Consumo medio (J)	Duración media (años)
50	90,04	19,84	34,04	27,12
100	95,51	19,77	40,99	22,52
150	97,4	19,72	42,61	21,67
200	94,04	19,72	40,54	22,77
250	101	19,5	42,25	21,85
300	96,8	19,56	42,62	21,66

Tabla 19. Consumo de energía y estimación de la batería de un nodo para 1 puerta de enlace y 2 canales de comunicación.

En cuanto al consumo de energía, a partir de los datos de la tabla se puede observar que el número de canales de comunicación activos no influye, presentándose valores en intervalos similares. La diferencia entre estos valores, tanto en los distintos modelados como en la cantidad de los nodos desplegados, está basada en la aleatoriedad de la distribución de estos, ya que la distancia de un nodo a la puerta de enlace no influye en sí en su tiempo de envío, y por tanto en su consumo.

8.1.3 Modelado 3: 4 canales de comunicación activos

En este tercer modelado, la distribución de los nodos sobre los cuatro canales de transmisión se refleja en la tabla 20. En ella se observa que el reparto de los nodos no llega a ser equitativo, pero es válido para la evaluación de la escalabilidad de la red.

N.º de nodos	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4
50	22 %	34 %	16 %	28 %
100	24 %	25 %	22 %	29 %
150	28,67 %	18 %	20 %	33,33 %
200	30 %	20 %	26,5 %	23,5 %
250	26 %	25,2 %	19,2 %	29,6 %
300	25,33 %	28 %	26 %	20,67 %

Tabla 20. Distribución de los nodos para 1 puerta de enlace y 4 canales de comunicación activos.

Nuevamente, igual que se ha realizado en los dos modelados anteriores, se presentan los datos de escalabilidad en la tabla 21 y los datos referentes al consumo de energía y a la duración de las baterías de los nodos en la tabla 22. A partir de estos datos se puede observar que el uso de 4 canales para las transmisiones, la tasa de extracción ha aumentado, y junto a ello, el número de colisiones ha disminuido.

N.º de nodos	Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Colisiones	DER
50	12 000	10 223	258	85,19 %
100	24 000	16 997	4 911	70,82 %
150	36 000	23 381	9 933	64,95 %
200	48 000	27 456	16 972	57,2 %
250	60 000	32 746	25 209	54,58 %
300	72 000	36 743	32 909	51,03 %

Tabla 21. DER. Resultados para 1 puerta de enlace y 4 canales de comunicación.

En cuanto al consumo de energía de los nodos reflejado en la tabla anterior, el valor medio de consumo ha descendido ligeramente respecto a los casos anteriores, a excepción del despliegue de 50 nodos, con lo cual la duración media de la batería se ha visto ligeramente afectada. Este comportamiento se justifica con la aleatoriedad de la distribución de los nodos a través de los canales de comunicación.

N.º de nodos	Consumo máximo (J)	Consumo mínimo (J)	Consumo medio (J)	Duración media (años)
50	90,2	19,5	28,66	32,21
100	100,1	19,5	38,92	23,72
150	101	19,55	40,14	23
200	94,32	19,51	43,18	21,38
250	96,72	19,5	46,19	19,99
300	102,3	19,56	44,88	20,57

Tabla 22. Consumo de energía y estimación de la batería de un nodo para 1 puerta de enlace y 4 canales de comunicación.

8.1.4 Modelado 4: 8 canales de comunicación activos

El último de los modelados de red provistos de una única puerta de enlace se corresponde con una distribución de los nodos sobre 8 canales de comunicación activos. De nuevo, la distribución de dichos nodos sobre los canales, reflejada en la tabla 23 deja ver que la distribución es menos equitativa que en los casos anteriores, mostrando en algún caso un porcentaje de distribución de triplica a otros.

N.º de nodos	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7	Canal 8
50	16 %	12 %	18 %	12 %	10 %	12 %	6 %	14 %
100	10 %	12 %	18 %	17 %	16 %	7 %	11 %	9 %
150	16,67 %	7,33 %	10,67 %	9,33 %	10,67 %	14,67 %	14 %	16,67 %
200	10 %	11,5 %	12 %	14,5 %	11,5 %	12,50 %	13,50 %	14,5 %
250	9,6 %	10,4 %	12,4 %	15,6 %	13,2 %	13,6 %	12,40 %	12,8 %
300	13,67 %	12,33 %	13,67 %	14,33 %	12,67 %	11,33 %	13,67 %	8,33 %

Tabla 23. Distribución de los nodos para 1 puerta de enlace y 8 canales de comunicación activos.

En lo que respecta a la tasa de extracción de datos, en este caso vemos que se mantiene el aumento del valor al haber duplicado nuevamente los canales de comunicación activos. Los datos quedan presentados en la tabla 24.

N.º de nodos	Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Colisiones	DER
50	12 000	10 479	333	87,33 %
100	24 000	19 194	2 473	79,96 %
150	36 000	26 258	6 177	72,94 %
200	48 000	31 977	12 436	66,62 %
250	60 000	38 547	17 459	64,25 %
300	72 000	45 035	22 114	62,55 %

Tabla 24. DER. Resultados para 1 puerta de enlace y 8 canales de comunicación.

Finalmente, en lo relativo al consumo de energía y duración de batería, en la tabla 25 se observa que se mantiene una ligera tendencia por las causas explicadas anteriormente.

N.º de nodos	Consumo máximo (J)	Consumo mínimo (J)	Consumo medio (J)	Duración media (años)
50	94,71	19,76	34,83	26,51
100	103,4	20,05	47,56	19,41
150	102,6	19,66	43,09	21,42
200	106,6	19,72	45,87	20,13
250	113,2	20,06	48,1	19,19
300	102,6	19,54	47,38	19,48

Tabla 25. Consumo de energía y estimación de la batería para 1 puerta de enlace y 8 canales de comunicación.

8.1.5 Comparativa de los modelados con una puerta de enlace

A través de la comparativa de los modelados de red con una única puerta de enlace, se va a mostrar la mejora de la escalabilidad de la red cuando se aumenta el número de canales utilizados. En la figura 23 se muestra dicha mejora de la tasa de extracción de datos en función de este aumento de canales, y su evolución decreciente de escalabilidad a medida que aumenta la cantidad de nodos desplegados.

Hay que tener en cuenta que, de cara a la evaluación, se va a establecer un valor mínimo para el DER como requerimiento para considerar que un modelado de red es viable. Este valor mínimo se va a establecer en un 90 % pues se pretende tener una red con una alta fiabilidad.

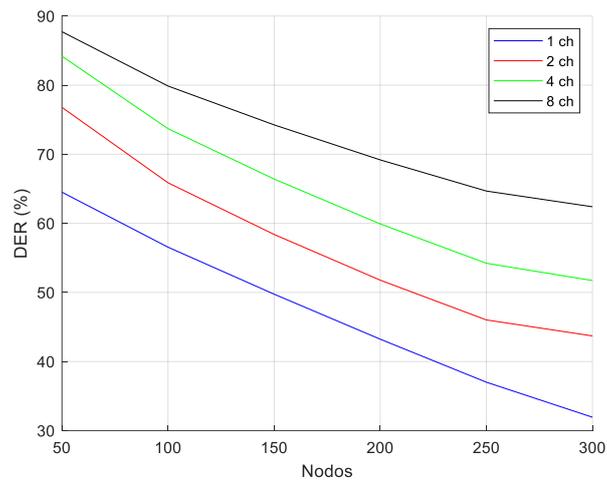


Figura 23. Tasa de extracción de datos de los modelados con una puerta de enlace.

Las colisiones también se ven disminuidas a medida que se aumentan los canales de transmisión utilizados, tal y como se ve reflejado en la figura 24. Estos valores, al igual que el DER, se están viendo afectados por el factor de aleatoriedad de la distribución de los nodos.

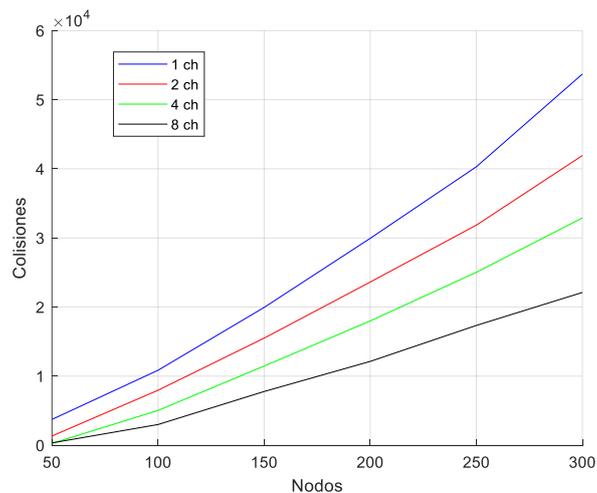


Figura 24. Balance de colisiones de los modelados con una puerta de enlace.

En la figura 25 se muestran los diagramas de distribución de los nodos en los tres casos en los que se ha utilizado más de un canal de comunicación. El comportamiento ideal sería ver cada diagrama con barras idénticas, es decir, cumpliendo los mismos porcentajes de distribución, 50 % para el caso de 2 canales, 25 % para 4 canales y 12,5 % para 8 canales. Sin embargo, se ve claramente que este requisito no se cumple.

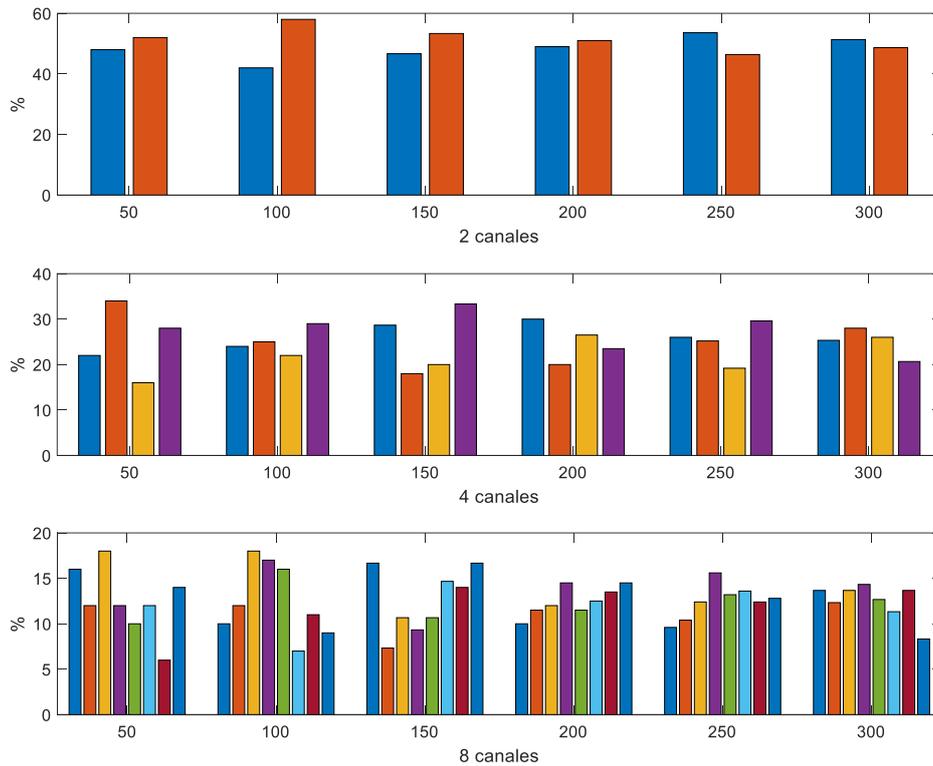


Figura 25. Diagramas de barras de distribución de los nodos.

Respecto al consumo de energía, en la figura 26 se muestra dicho consumo total de la red a partir de la suma de consumo de todos los nodos en cada modelado, en el tiempo de simulación de 10 días, comprobando que el consumo es, en un principio, independiente de la escalabilidad de la red.

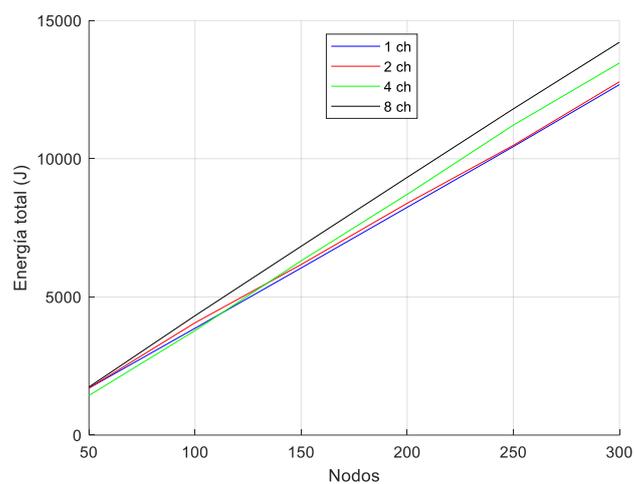


Figura 26. Consumo total de energía de los modelados con una puerta de enlace.

Finalmente, en la figura 27 se puede observar la variación que se produce sobre el factor de ensanchamiento de los nodos consecuencia del ADR en el caso de un canal activo y 50 nodos desplegados.

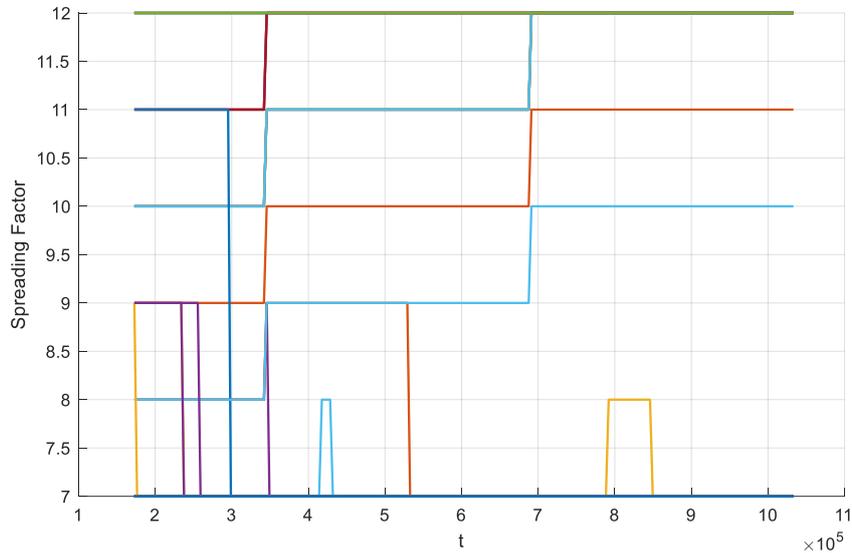


Figura 27. Evolución del factor de ensanchamiento de los nodos para una puerta de enlace y un canal activo.

En la figura 28 se muestra la misma gráfica para el caso de 4 canales activos y 50 nodos. En esta se reflejan mayores cambios en el factor de ensanchamiento hacia valores más bajos, debido a la disposición de más canales. Realmente este comportamiento no se puede garantizar al no controlar la distribución de los nodos.

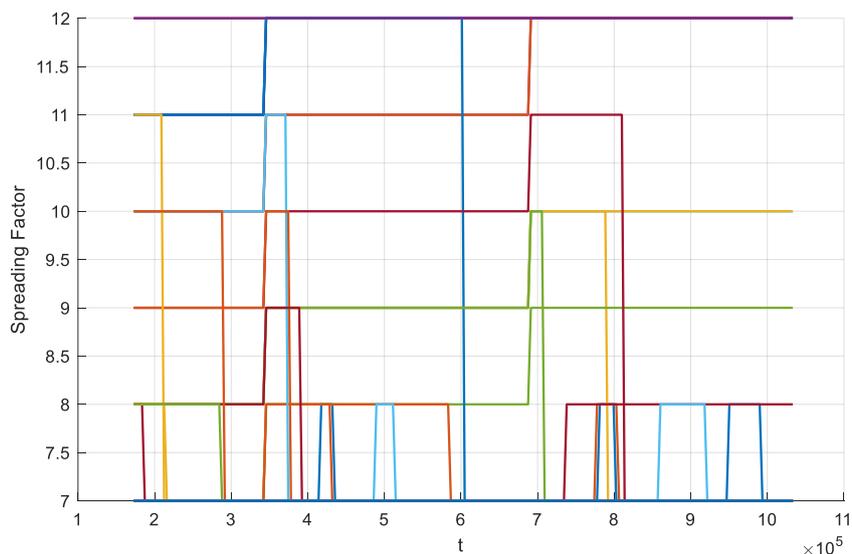


Figura 28. Evolución del factor de ensanchamiento de los nodos para una puerta de enlace y 4 canales activos.

8.2 Modelados de red con dos puertas de enlace

A continuación, se van a detallar los resultados obtenidos al usar dos puertas de enlace en la red. Al igual que en los casos anteriores, son 4 modelados diferenciados por los canales activos para la transmisión de los nodos. La figura 29 muestra en entorno virtual, donde se puede ver la disposición de las puertas de enlace.

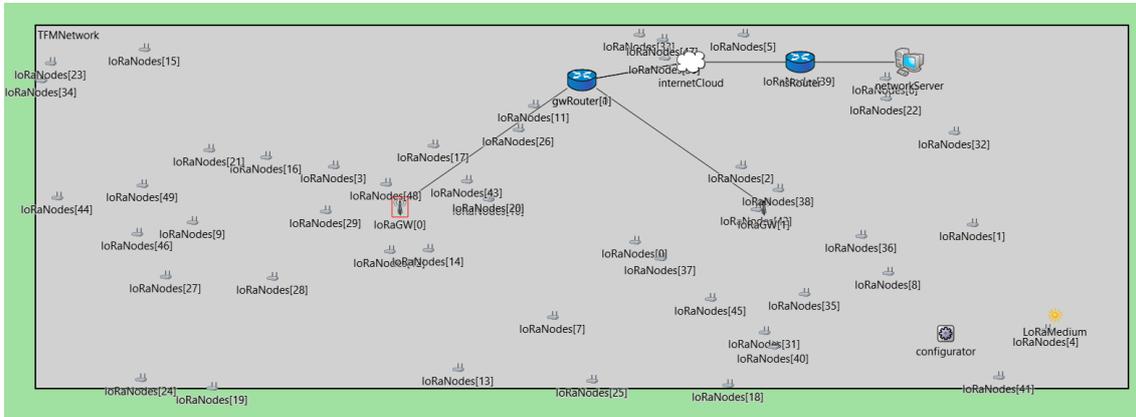


Figura 29. Entorno Qt con la red desplegado para el caso de 2 puertas de enlace y 50 nodos.

En estos modelados se pretende ver que implica añadir una segunda puerta de enlace. Hay que tener en cuenta que los nodos no transmiten a una puerta de enlace específica, sino que transmiten cada paquete a todas las puertas de enlace dentro de su rango de cobertura. El servidor de red, en este caso, se encarga de eliminar los paquetes duplicados.

8.2.1 Modelado 5: 1 canal de comunicación activo

En la tabla 26 se observa que el número de paquetes recibidos en el servidor de red es mayor que el número de paquetes enviados por los nodos. El servidor se encarga de eliminar los desechos los paquetes duplicados y calcular la tasa de extracción real. Las colisiones reflejadas en la tabla se corresponden con la suma las colisiones producidas en ambas puertas de enlace.

N.º de nodos	Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Colisiones totales	DER
50	12 000	15 073	7 528	77,39 %
100	24 000	27 863	17 122	72,01 %
150	36 000	33 915	38 672	58,53 %
200	48 000	35 139	63 812	50,87 %
250	60 000	47 139	74 815	48,64 %
300	72 000	48 763	101 261	44,09 %

Tabla 26. DER. Resultados para 2 puertas de enlace y 1 canal de comunicación.

La tabla 27 refleja el consumo de energía y la duración de la batería de los nodos para este caso, observando que no existe ninguno comportamiento distinto en los nodos, condicionado por la adición de la segunda puerta de enlace.

N.º de nodos	Consumo máximo (J)	Consumo mínimo (J)	Consumo medio (J)	Duración media (años)
50	78,64	19,44	33,76	27,34
100	101,12	19,45	36,06	25,60
150	94,46	19,50	41,10	22,46
200	98,14	19,55	42,67	21,63
250	93,00	19,50	39,79	23,20
300	97,26	19,72	42,04	21,96

Tabla 27. Consumo de energía y duración de los nodos para 2 puertas de enlace y 1 canal.

8.2.2 Modelado 6: 2 canales de comunicación activos

Nuevamente en la tabla 28 vemos el número de paquetes recibidos por el servidor con un valor superior a los paquetes enviados por los nodos. El DER, por supuesto, mejora al contar con un canal de comunicación más. Respecto a la duración de las baterías en la tabla 29 se observa que mantiene los valores.

N.º de nodos	Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Colisiones	DER
50	12 000	17 769	3561	87,4 %
100	24 000	28 755	16975	73,06 %
150	36 000	37 057	34 245	64,37 %
200	48 000	47 523	46 626	61,13 %
250	60 000	57 061	59 876	59,63 %
300	72 000	62 302	82 103	55,07 %

Tabla 28. DER. Resultados para 2 puertas de enlace y 2 canales de comunicación.

N.º de nodos	Consumo máximo (J)	Consumo mínimo (J)	Consumo medio (J)	Duración media (años)
50	90,15	19,44	34,13	27,05
100	95,19	19,71	40,52	22,78
150	95	19,71	41,83	22,07
200	101,19	19,66	42,54	21,7
250	98,23	19,45	41,51	22,24
300	99,18	19,45	43,6	21,18

Tabla 29. Consumo de energía y duración de los nodos para 2 puertas de enlace y 2 canales.

8.2.3 Modelado 7: 4 canales de comunicación activos

Las tablas 30 y 31 muestran los datos de escalabilidad y consumo correspondientes al penúltimo modelado, verificando que se siguen cumpliendo la tendencia de los últimos dos modelados.

N.º de nodos	Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Colisiones	DER
50	12 000	20 082	905	95,84 %
100	24 000	31 897	11 921	80,16 %
150	36 000	46 875	20 275	76,39 %
200	48 000	55 495	35 214	70,2 %
250	60 000	66 103	50 563	65,9 %
300	72 000	75 294	64 982	64,03 %

Tabla 30. DER. Resultados para 2 puertas de enlace y 4 canales de comunicación.

N.º de nodos	Consumo máximo (J)	Consumo mínimo (J)	Consumo medio (J)	Duración media (años)
50	90,19	19,55	30,67	30,1
100	94,58	19,5	41,46	22,27
150	100,13	19,54	41,95	22,01
200	102,45	19,46	46,2	19,98
250	98,6	19,5	46,5	19,85
300	107,97	19,5	47,45	19,46

Tabla 31. Consumo de energía y duración de los nodos para 2 puertas de enlace y 2 canales.

8.2.4 Modelado 8: 8 canales de comunicación activos

Finalmente, las tablas 32 y 33 muestran los datos de escalabilidad y consumos referentes al último modelado, con 2 puertas de enlace y 8 canales de comunicación activos. Este es el que mejores resultados ofrece de los 8 modelados.

N.º de nodos	Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Colisiones	DER
50	12 000	21 333	244	97,98 %
100	24 000	36 678	8 496	86,81 %
150	36 000	53 431	12 208	85,94 %
200	48 000	64 286	25 982	79,43 %
250	60 000	81 360	31 435	77,65 %
300	72 000	91 232	45 422	74,16 %

Tabla 32. DER. Resultados para 2 puertas de enlace y 8 canales de comunicación.

N.º de nodos	Consumo máximo (J)	Consumo mínimo (J)	Consumo medio (J)	Duración media (años)
50	96	19,79	33,84	27,28
100	106,97	20,09	48,68	18,96
150	104,29	19,54	43,58	21,19
200	107,54	19,61	47,16	19,57
250	115,58	19,61	49,8	18,54
300	101,9	19,48	48,05	19,21

Tabla 33. Consumo de energía y duración de los nodos para 2 puertas de enlace y 8 canales.

8.2.5 Comparativa de los modelados con dos puertas de enlace

Al igual que en los modelados de una puerta de enlace, se va a realizar una comparativa de estos resultados. La tasa de extracción de datos y las colisiones se reflejan en las figuras 31 y 32 respectivamente.

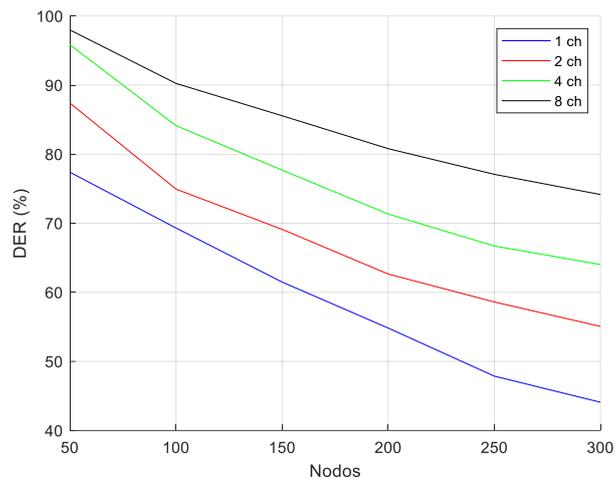


Figura 30. Tasa de extracción de datos de los modelados con dos puertas de enlace.

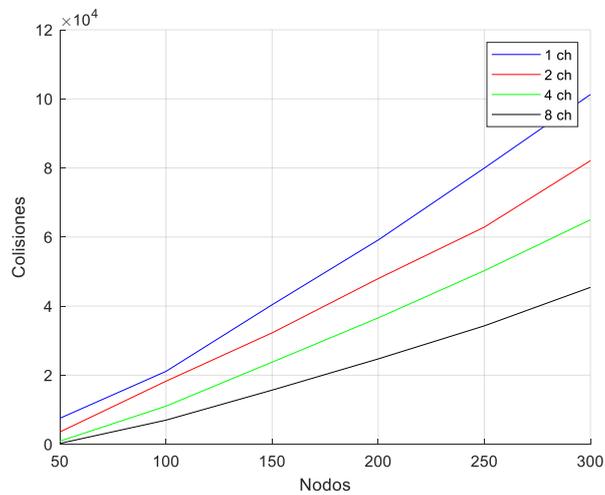


Figura 31. Balance de colisiones de los modelados con dos puertas de enlace.

En la figura 32 vemos los diagramas de distribución de los nodos en los tres últimos modelados, comprobando que nuevamente no se dan las condiciones de igualdad en el reparto de los nodos.

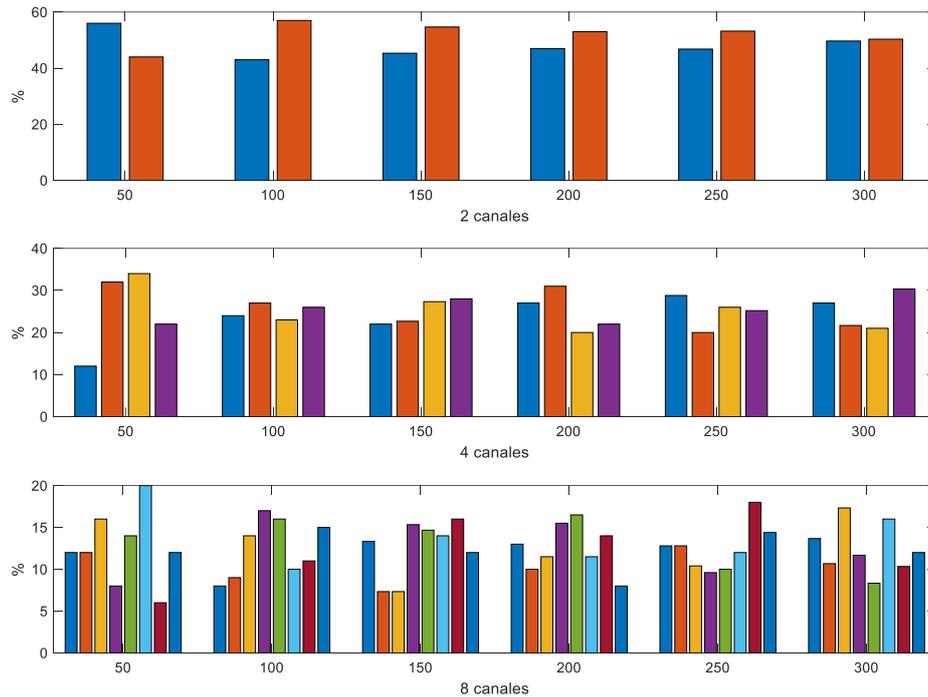


Figura 32. Diagramas de barras de distribución de los nodos en los modelados con dos puertas de enlace.

Respecto al consumo de energía, en la figura 33 se muestra dicho consumo total de la red, y se comprueba que el incremento es de nuevo lineal.

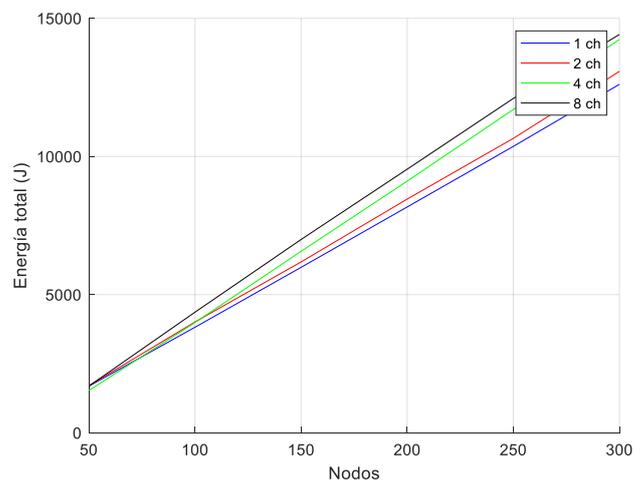


Figura 33. Consumo total de energía de los modelados con dos puertas de enlace.

Finalmente, en las figuras 34 y 35 se puede observar la variación del factor de ensanchamiento que se produce a consecuencia del ADR en los casos de 50 nodos desplegados y 1 canal y 4 canales activos respectivamente, comprobando el aumento de los decrementos del factor a causa de una mayor disponibilidad de canal.

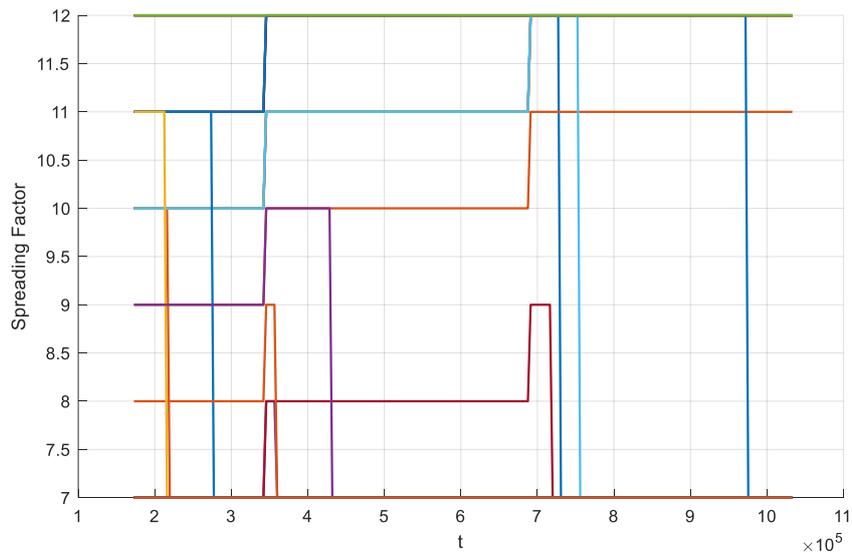


Figura 34. Evolución del factor de ensanchamiento de los nodos para dos puertas de enlace y un canal activo.

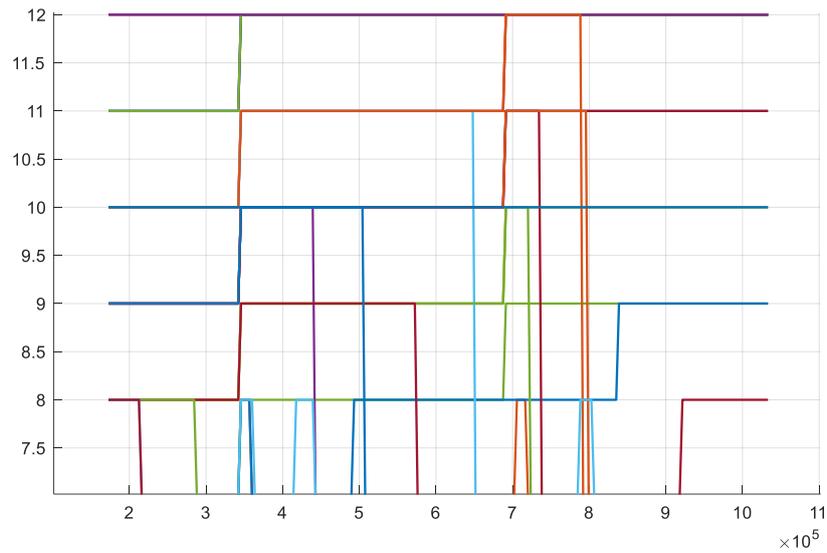


Figura 35. Evolución del factor de ensanchamiento de los nodos para dos puertas de enlace y cuatro canales activos.

Capítulo 9. Conclusiones y propuesta de trabajo futuro

9.1 Conclusiones

Finalizado el presente proyecto, se puede concluir en un principio que, tras la evaluación de las simulaciones, los objetivos de la red marcados no han sido satisfechos. No obstante, se podría considerar una reducción estos objetivos debido a la funcionalidad de la aplicación en sí, y con ello aumentar la tolerancia de pérdida de paquetes.

El requerimiento inicial del 90 % marcado para la tasa de extracción de datos no se cumple en ninguno de los modelados. Nuevamente, considerando la funcionalidad de la aplicación, este valor se puede reducir al 70 % de forma que se cuentan con modelados que garantizan una red viable. Hay que tener en cuenta que los nodos realizan las transmisiones en instantes de tiempo simultáneos, al no existir la posibilidad de sincronización que divida los envíos de cada nodo en rangos temporales.

En cuanto a la duración de la batería de los nodos, los valores obtenidos cumplen la característica de alta durabilidad, aunque los valores están condicionados, por un lado, por los parámetros de consumo, donde solo se tiene en cuenta los parámetros del chip SX1276 de LoRa y, por otro lado, por la inexistencia del proceso de activación completo en el simulador.

En líneas generales, la red LoRaWAN se presenta como una opción viable, aunque esta deberá ser decidida a partir de una simulación con parámetros concretos para los componentes de la red y el entorno donde se haya planificado su despliegue.

9.2 Propuesta de trabajo futuro

En líneas generales, todo proyecto de ingeniería suele requerir mejoras tras haber realizado las primeras planificaciones. A continuación, se van a detallar unas líneas de trabajo futuras de cara a realizar los modelados de este proyecto sobre un entorno real.

Lo primero que se deberá es determinar la ubicación real del proyecto. Se pretende que, en un principio sea el campus de Vera de la Universitat Politècnica de Valencia, nombrado como ejemplo en este documento, y mostrado en la figura 36. Una vez escogida la localización de la red, se deberá determinar su trayecto de pérdidas. Para se podrá hacer uso de simuladores de modelos de propagación de interior, o bien, realizar pruebas experimentales por el campus, de modo que se consigan un trayecto de pérdidas lo más preciso posible.



Figura 36. Campus de Vera de la Universitat Politècnica de València.

En segundo lugar, habrá que determinar los modelos de nodo y puerta de enlace que conformarán la red. Del nodo, se deberá conocer los parámetros de consumo reales que conforman el chip de LoRa junto al microcontrolador que se encarga de medir las variables del entorno. De la puerta de enlace se deberá conocer la ganancia de la antena asociada y las pérdidas asociadas a ella.

Finalmente, en temas de simulación se deberán abordar el reparto equitativo de los nodos en los distintos canales de transmisión activos para incrementar la eficacia de la red, e aumentar el rango de envío de paquetes de los nodos de cara a reducir la colisión entre ellos.

Capítulo 10. Bibliografía

- [1] R. Minerva, A. Biru and D. Rotondi, “Towards a definition of the Internet of Things (IoT)”, *IEEE Internet of Things*, May 2015.
- [2] K. Patel and S. Patel, “Internet of Things-IOT: Definition, Characteristics, Architecture, Enabling Technologies, Application & Future Challenges”, May 2016.
- [3] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), “Tangible Cultural Heritage”, <http://www.unesco.org/new/en/cairo/culture/tangible-cultural-heritage> [Online].
- [4] CollectionCare, <https://www.collectioncare.eu> [Online].
- [5] Statista, “Internet of Things connected devices installed base worldwide from 2015 to 2025”, <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide> [Online].
- [6] U. Raza, P. Kulkarni and M. Sooriyabandara, “Low Power Wide Area Networks: An Overview”, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2017.
- [7] IoT Analytics, “LPWAN emerging as fastest growing IoT communications technology”, <https://iot-analytics.com/lpwan-market-report-2018-2023-new-report> [Online], September 2018.
- [8] LoRa Alliance, “LoRaWAN 1.1 Specification”, 2017.
- [9] LoRa Alliance, “LoRaWAN 1.1 Regional Parameters”, 2017.
- [10] LoRa Alliance, “LoRaWAN What is it? A technical overview of LoRa and LoRaWAN”, November 2015.
- [11] ETSI, “Spectrum Requirements for Short Range Device, Metropolitan Mesh Machine Networks and Smart Metering (SM) applications”, 2011.
- [12] Semtech, “LoRa Modulation Basics Rev. 2”, 2015.
- [13] Semtech, “AN1200.13 SX1272/3/6/7/8: LoRa Modem Designer’s Guide Rev. 1”, 2013.
- [14] UPV, “Fondo de Arte”, <http://cultura.upv.es/colecciones/content/obrasdearte/cas> [Online].
- [15] J. Laborda, “Desarrollo de un nodo inalámbrico de bajo consumo basado en técnicas de IoT para monitorización de patrimonio cultural”, 2018.
- [16] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen, and M. Pettissalo, “On the Coverage of LPWANs: Range Evaluation and Channel Attenuation Model for LoRa Technology”, 2015.
- [17] M. Bor, U. Roedig, T. Voigt and J. M. Alonso, “Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?”, November 2016.
- [18] OMNeT++, “What is OMNeT++?”, <https://omnetpp.org/intro/> [Online].



- [19] FLoRa, <https://flora.aalto.fi/> [Online].
- [20] M. Slabicki, G. Preamsankar and M. di Francesco, “Adaptative Configuration of LoRa Networks for Dense IoT Deployments”, 2018.
- [21] LoRaSim, <https://www.lancaster.ac.uk/scc/sites/lora/lorasim.html> [Online].



Anexos

A. Fichero xml de consume de energía

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<root>
  <supplyVoltage value="3.3"/>
  <receiverReceivingSupplyCurrent value="9.7"/>
  <receiverBusySupplyCurrent value="9.7"/>
  <idleSupplyCurrent value="0.0001"/>
  <txSupplyCurrents>
    <txSupplyCurrent txPower="2" supplyCurrent="24"/>
    <txSupplyCurrent txPower="3" supplyCurrent="24"/>
    <txSupplyCurrent txPower="4" supplyCurrent="24"/>
    <txSupplyCurrent txPower="5" supplyCurrent="25"/>
    <txSupplyCurrent txPower="6" supplyCurrent="25"/>
    <txSupplyCurrent txPower="7" supplyCurrent="25"/>
    <txSupplyCurrent txPower="8" supplyCurrent="25"/>
    <txSupplyCurrent txPower="9" supplyCurrent="26"/>
    <txSupplyCurrent txPower="10" supplyCurrent="31"/>
    <txSupplyCurrent txPower="11" supplyCurrent="32"/>
    <txSupplyCurrent txPower="12" supplyCurrent="34"/>
    <txSupplyCurrent txPower="13" supplyCurrent="35"/>
    <txSupplyCurrent txPower="14" supplyCurrent="44"/>
  </txSupplyCurrents>
</root>
```

B. Código de descripción de la topología de red

```
package loranetwork.simulations;

import inet.applications.udpapp.UDPBasicApp;
import inet.node.inet.Router;
import inet.node.internetcloud.InternetCloud;
import loranetwork.LoRaPhy.LoRaMedium;
import loranetwork.LoraNode.LoRaNode;
import loranetwork.LoraNode.LoRaGW;
import inet.node.inet.StandardHost;
import inet.networklayer.configurator.ipv4.IPv4NetworkConfigurator;
import inet.node.ethernet.Eth1G;

@license(LGPL);
network TFMNetwork
{
    parameters:
        int numberOfNodes = default(1);
        int numberOfGateways = default(1);
        int networkSizeX = default(1);
        int networkSizeY = default(1);
        @display("bgb=1500,500");

    submodules:
        LoRaNodes[numberOfNodes]: LoRaNode {
            @display("p=250,250");
        }
        LoRaGW[numberOfGateways]: LoRaGW {
            @display("p=750,250;is=s");
        }
        LoRaMedium: LoRaMedium {
            @display("p=1400,400");
        }
        networkServer: StandardHost {
            parameters:
                @display("p=1200,50");
        }
        configurator: IPv4NetworkConfigurator {
            parameters:
                assignDisjunctSubnetAddresses = false;
                @display("p=1250,425");
        }
        internetCloud: InternetCloud {
            @display("p=900,50");
        }
        gwRouter[numberOfGateways]: Router {
            @display("p=750,75");
        }
        nsRouter: Router {
            @display("p=1050,50");
        }
    }

    connections:
```



```
networkServer.ethg++ <--> Eth1G <--> nsRouter.ethg++;  
nsRouter.pppg++ <--> Eth1G <--> internetCloud.pppg++;  
for i=0..numberOfGateways-1 {  
    internetCloud.pppg++ <--> Eth1G <--> gwRouter[i].pppg++;  
    gwRouter[i].ethg++ <--> Eth1G <--> loRaGW[i].ethg++;  
}  
}
```

C. Archivo de configuración inicial de simulación de red

```
[General]
network =TFMNetwork
**.vector-recording = false

**.numberOfChannels = ${numberOfChannels = 1, 2, 4, 8}

**.loRaGW[0].numUdpApps = 1
**.loRaGW[0].packetForwarder.localPort = 2000
**.loRaGW[0].packetForwarder.destPort = 1000
**.loRaGW[0].packetForwarder.destAddresses = "networkServer"

**.loRaGW[1].numUdpApps = 1
**.loRaGW[1].packetForwarder.localPort = 2000
**.loRaGW[1].packetForwarder.destPort = 1000
**.loRaGW[1].packetForwarder.destAddresses = "networkServer"

**.networkServer.numUdpApps = 1
**.networkServer.udpApp[0].typename = "NetworkServerApp"
**.networkServer.udpApp[0].destAddresses = "loRaGW[0]"
**.networkServer.udpApp[0].destPort = 2000
**.networkServer.udpApp[0].localPort = 1000
**.networkServer.udpApp[0].adrMethod = "max"

**.numberOfNodes = ${numberOfNodes=50..300 step 50}
**.numberOfPacketsToSend = 0
warmup-period = 1d
sim-time-limit = 7d
simtime-resolution = -11

**.timeToFirstPacket = exponential(10s)
**.timeToNextPacket = 3600s
**.alohaChannelModel = false

**.loRaNodes[*]**.evaluateADRinNode = true
**.networkServer.**.evaluateADRinServer = true

#nodes features
**.loRaNodes[*]**.initFromDisplayString = false
**.loRaNodes[*]**.initialLoRaSF = intuniform(7, 12)
**.loRaNodes[*]**.initialLoRaBW = 125 kHz
**.loRaNodes[*]**.initialLoRaCR = 4
**.loRaNodes[*]**.initialLoRaTP = (2dBm + 3dBm*intuniform(0, 4))

# random deployment of nodes
**.loRaNodes[*]**.initialX = uniform(0m, 1500m)
**.loRaNodes[*]**.initialY = uniform(0m, 500m)

#power consumption features
**.loRaNodes[*].LoRaNic.radio.energyConsumerType = "LoRaEnergyConsumer"
**.loRaNodes[*]**.energySourceModule = "IdealEpEnergyStorage"
**.loRaNodes[*].LoRaNic.radio.energyConsumer.configFile =
xmldoc("energyConsumptionParameters.xml")
```



```
#general features
**.sigma = 7.08
**.constraintAreaMinX = 0m
**.constraintAreaMinY = 0m
**.constraintAreaMinZ = 0m
**.constraintAreaMaxX = 1500m
**.constraintAreaMaxY = 500m
**.constraintAreaMaxZ = 0m

LoRaNetworkTest.**.radio.separateTransmissionParts = false
LoRaNetworkTest.**.radio.separateReceptionParts = false

**.delayer.config = xmldoc("cloudDelays.xml")
**.radio.radioMediumModule = "LoRaMedium"
**.LoRaMedium.pathLossType = "LoRaPathLossOulu"
**.minInterferenceTime = 0s
**.displayAddresses = false

[Config oneGW]
**.numberOfGateways = 1
**.loRaGW[*]**.initFromDisplayString = true

[Config twoGW]
**.numberOfGateways = 2
**.loRaGW[*]**.initFromDisplayString = false
**.loRaGW[0]**.initialX = 500m
**.loRaGW[1]**.initialX = 1000m
**.loRaGW[*]**.initialY = 250m
**.gwRouter[0]**.initialX = 500m
**.gwRouter[1]**.initialX = 1000m
**.gwRouter[*]**.initialY = 200m
```