

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



Trabajo Fin de Grado

**CONVERGENCIA DE LAS TECNOLOGÍAS LP-WAN Y
*MULTI-ACCESS EDGE COMPUTING***



AUTOR: Ramón J. Sánchez Iborra
DIRECTOR: M^a Dolores Cano Baños
Julio – 2018

| | |
|---|---|
| Autor | Ramón Jesús Sánchez Iborra |
| E-mail del Autor | ramonjsi@gmail.com |
| Director(es) | María Dolores Cano Baños |
| E-mail del Director | mdolores.cano@upct.es |
| Codirector(es) | |
| Título del TFM | Convergencia de las Tecnologías LP-WAN y <i>Multi-Access Edge Computing</i> |
| Descriptor(es) | LP-WAN, Multi-Access Edge Computing, IoT |
| <p>Resumen</p> <p>Nuevas tecnologías están apareciendo como prometedores habilitadores para las futuras redes dentro del ámbito de Internet de las Cosas (<i>Internet of Things</i>, IoT). Dichas propuestas abarcan distintos aspectos dentro de estos sistemas: comunicaciones, organización de la arquitectura, orquestación de servicios, seguridad, etc. Enfocándonos en la arquitectura de la red, han surgido nuevos modelos que proponen acercar las capacidades de procesamiento y almacenamiento a los nodos finales; a diferencia de lo que propone el procesamiento en la nube (<i>cloud computing</i>), que plantea situar estos elementos en el <i>core</i> de la red, es decir, alejados de los dispositivos de usuario o sensores/actuadores. Así, siguiendo esta estrategia, el paradigma <i>Multi-access Edge Computing</i> (MEC) propone situar la inteligencia del sistema en el borde de la red de acceso (<i>Radio Access Network</i>, RAN), es decir, entre ésta red donde se encuentran los dispositivos finales y la nube (Internet). Esta estrategia permite reducir la latencia en las comunicaciones desde/hacia la red final, así como habilita el acceso a parámetros de la propia RAN en tiempo real. Desde el punto de vista de comunicaciones IoT, otra tecnología que está recibiendo gran atención durante los últimos tiempos es la llamada <i>Low Power - Wide Area Network</i> (LP-WAN). Las soluciones basadas en este paradigma de comunicaciones prometen transmisiones a larga distancia de más de 10 km y una eficiencia energética que permite una duración de las baterías de los nodos finales de aproximadamente 10 años.</p> <p>Así, en este trabajo ambos paradigmas son ampliamente explorados y su potencial convergencia es discutida y analizada. Además, se muestran los resultados de un despliegue real con varios casos de uso. Concretamente, un nodo MEC se ha integrado en un sistema LP-WAN con el objetivo de albergar distintos servicios no ofrecidos por defecto en este tipo de sistemas: (i) gestión en tiempo real de los parámetros físicos de transmisión de la red LP-WAN, (ii) integración con IPv6, (iii) delegación de tareas de almacenamiento y (iv) rápido acceso a información condicionada por contexto desde los nodos finales. Los resultados mostrados muestran la validez de la arquitectura propuesta, que integra de forma eficiente dos novedosos paradigmas: <i>Multi-Access Edge Computing</i> y LP-WAN.</p> | |
| Titulación | Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación |
| Departamento | Tecnologías de la Información y las Comunicaciones |
| Fecha de Presentación | Julio - 2018 |

Índice de contenidos

| | |
|---|-----------|
| CAPITULO 1: MOTIVACIÓN DEL TRABAJO..... | 1 |
| 1.1. Introducción..... | 1 |
| 1.2. Objetivos y etapas del proyecto..... | 3 |
| 1.3. Entorno de trabajo..... | 3 |
| 1.4. Estructura de la memoria..... | 4 |
| CAPITULO 2: PARADIGMAS <i>MULTI-ACESS EDGE COMPUTING</i> Y LP-WAN..... | 5 |
| 2.1. Introducción..... | 5 |
| 2.2. <i>Multi-Access Edge Computing</i> | 5 |
| 2.2.1. Arquitectura de red..... | 5 |
| 2.2.2. Aplicaciones y servicios basados en MEC..... | 6 |
| 2.3. LP-WAN..... | 10 |
| 2.3.1. LoRaWAN..... | 10 |
| CAPITULO 3: CONVERGENCIA DE LOS PARADIGMAS MEC Y LP-WAN..... | 13 |
| 3.1. Introducción..... | 13 |
| 3.2. Caso de uso. Servicios implementados..... | 15 |
| 3.2.1. Gestión automática de la red acceso (RAN)..... | 15 |
| 3.2.2. Integración de IPv6..... | 16 |
| 3.2.3. Delegación de tareas de almacenamiento y cacheo de datos..... | 16 |
| 3.2.4. Descarga de información contextualizada..... | 17 |
| CAPITULO 4: RESULTADOS..... | 19 |
| 4.1. Introducción..... | 19 |
| 4.2 Banco de pruebas..... | 19 |
| 4.3. Resultados..... | 21 |
| 4.4. Conclusión..... | 25 |
| CAPITULO 5: CONCLUSIONES..... | 27 |
| 5.1. Objetivos logrados..... | 27 |
| 5.2. Conclusiones finales y líneas futuras..... | 28 |
| REFERENCIAS..... | 29 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Arquitectura MEC..... | 2 |
| Figura 2.1. Arquitectura de IPv6 sobre LoRaWAN..... | 8 |
| Figura 2.2. Topología de una red LoRaWAN..... | 9 |
| Figura 3.1. Arquitectura de convergencia MEC-LP-WAN..... | 13 |
| Figura 4.1. Equipamiento empleado..... | 20 |
| Figura 4.2. Arquitectura propuesta..... | 20 |
| Figura 4.3. Funcionamiento del algoritmo adaptativo: variación del DR con respecto al RSSI recibido..... | 21 |
| Figura 4.4. Nivel de RSSI registrado por la estación base para cada paquete recibido desde el nodo final..... | 22 |
| Figura 4.5. RTT obtenido para el test basado en ping ICMPv6..... | 23 |
| Figura 4.6. Comparación del RTT y PDR obtenidos en el servicio de cacheo de datos..... | 24 |
| Figura 4.7. Escenario y puntos de maestro para el test nomádico..... | 24 |
| Figura 4.8. PDR obtenido para distintos puntos fijos de muestreo entre el nodo final y la estación base..... | 25 |

Capítulo 1

Motivación del Trabajo

1.1 Introducción

La nueva generación de redes comunicaciones como 5G, Internet de las Cosas (*Internet of Things*, IoT), etc. conllevará una profunda revolución en las actuales arquitecturas de telecomunicaciones. Esta transformación deberá realizarse desde una perspectiva holística, con el objetivo de alcanzar el objetivo de albergar un elevado número de novedosos servicios heterogéneos. Esta heterogeneidad implicará que la red sea ampliamente flexible y adaptable para satisfacer las demandas de los muy diferentes dispositivos finales que tendrán acceso a la nueva ola de servicios futuros de Internet [1]. Estos servicios, requerirán un gran intercambio de información entre los dispositivos finales y el “cerebro” del sistema, además, ciertas aplicaciones exigirán “súper-baja” latencia. Por estas razones, el paradigma de computación en la nube, tan explotado en los últimos tiempos, presenta importantes dificultades para encarar estos retos: primero, el gran volumen de datos intercambiados entre la red de acceso (Radio Access Network, RAN) y la nube puede sobrecargar la red de distribución (*backhaul network*), ocasionando una degradación importante en su desempeño. Además, utilizando el procesado en la nube, el tiempo de respuesta puede ser demasiado elevado para ciertas aplicaciones, e.g., evasión de accidentes de tráfico, gestión de *smart-grids*, notificaciones de alarmas, etc. Por estas razones, un nuevo paradigma de red llamado *Multi-access Edge Computing* (MEC) está ganando gran relevancia durante los últimos tiempos. Siguiendo esta propuesta, la inteligencia y la capacidad de almacenado del sistema se sitúan en el borde de la RAN, es decir, entre la propia red de acceso que alberga los dispositivos finales y la nube (ver Fig. 1.1). Por lo tanto, el paradigma MEC permite el despliegue de servicios *cloud* próximos a los usuarios finales, con la ventaja de tener información de parámetros físicos de la red acceso en tiempo real [2].

Poniendo el foco sobre la diversidad de servicios que serán soportados para la nueva generación de infraestructuras de telecomunicaciones, los sistemas de comunicaciones entre máquinas (*Machine-Type Communications*, MTC) y, en general las redes IoT, tendrán una marcada relevancia. Se espera que los dispositivos IoT generen una inmensa cantidad de mensajes cortos y no orientados a conexión cada día, con unos requerimientos de fiabilidad de entrega muy notables. Además, con el objetivo de (i) mejorar la escalabilidad de la red, (ii) disminuir la complejidad de gestión y (iii) reducir la inversión económica, reducir el número de estaciones base (*gateways*) ha cobrado gran interés. Por lo tanto, se requiere de nuevas soluciones para habilitar conexiones fiables y de larga distancia a los dispositivos MTC. En esta línea, una tecnología que ha ganado gran relevancia durante los últimos tiempos es la conocida como *Low Power - Wide Area Network* (LP-WAN). Las soluciones basadas en este paradigma de comunicación prometen distancias de transmisión por encima de los 10 km y una alta eficiencia energética que permiten una vida útil de la batería de los nodos finales próxima a los 10 años [3].

En concreto, una de las soluciones LP-WAN que está tomando mayor impulso últimamente es LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*), la cual es promovida por LoRaWAN Alliance (Cisco, IBM, Semtech, etc.) [4]. Tal y cómo se detalla en las secciones siguientes, LoRaWAN hace uso de la modulación LoRa que facilita el despliegue de topologías en estrella, cubriendo grandes extensiones de terreno

incluso en escenarios urbanos [5]. Una de las características más interesantes de LoRa es la posibilidad de configurar ciertos parámetros de transmisión, permitiendo rangos de cobertura mayor, mejores tasas de transmisión o un incremento en la fiabilidad de las comunicaciones. Así, LoRa presenta un cierto grado de flexibilidad para ser adaptada a las condiciones de propagación reales o las necesidades de los nodos finales.

En este trabajo, el paradigma MEC es explorado ampliamente y aplicado al caso de las redes LP-WAN. Tal y cómo se especificó anteriormente, muchas tareas encajan perfectamente para ser acomodadas en nodos MEC, por lo cual, se propone en este estudio implementar una serie de servicios dentro de un nodo MEC con el objetivo de proveer a la red LoRaWAN de unos servicios adicionales no contemplados en un principio por este tipo de sistemas. Los servicios propuestos son los siguientes: (i) gestión automática de la RAN a nivel físico, (ii) traducción de tráfico IPv6, (iii) descarga de tareas de almacenado y agregación de datos y (iv) rápida entrega de información contextualizada a los nodos finales. De esta forma, el principal objetivo de este trabajo es desplegar una red LP-WAN con el soporte ofrecido por un nodo MEC. Para los autores, este es el primer trabajo que aborda la convergencia de ambos paradigmas. Las principales contribuciones son las siguientes:

1. El novedoso paradigma MEC es ampliamente explorado y discutido.
2. El despliegue de un nodo MEC dentro de un ecosistema IoT es adicionalmente examinado, identificando aplicaciones y escenarios clave.
3. Se presentan los resultados de un caso de estudio en el que una red real LoRaWAN es enriquecida y gestionada por un nodo MEC. Esta estrategia permite mejorar las cualidades de la red LP-WAN: (i) incrementando el rango de cobertura de la red y su fiabilidad en comparación con la gestión estática del físico de la RAN, (ii) estableciendo conectividad IPv6 entre los dispositivos finales y redes externas (e.g., Internet), (iii) permitiendo la agregación de datos y almacenado de información en el nodo MEC para ofrecerlos al exterior de la red LP-WAN y (iv) habilitando a los nodos finales a acceder de forma rápida a información contextualizada almacenada en el nodo MEC.

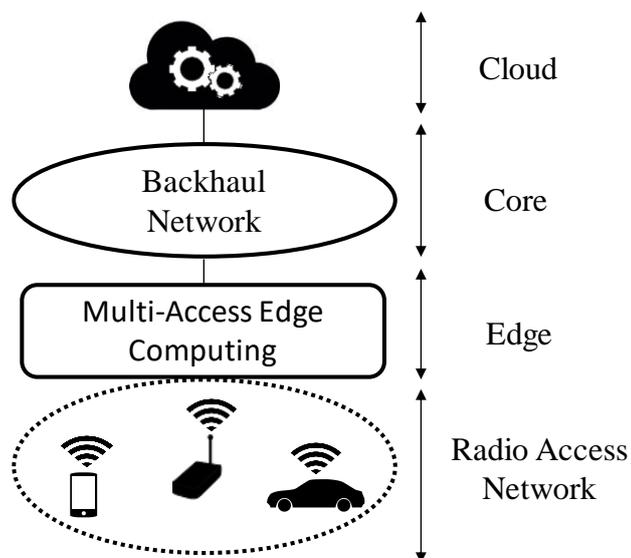


Figura 1.1. Arquitectura MEC.

1.2 Objetivos y etapas del TFG

En este trabajo se plantea como objetivo principal la integración de un nodo MEC dentro de una red LP-WAN, realizando un estudio teórico acerca de la viabilidad de esta arquitectura y llevando a cabo un despliegue real de dicho sistema soportando diversos servicios.

Para llevar a cabo dicha evaluación de prestaciones, el trabajo se elaborará pasando por una serie de etapas bien definidas.

- 1- Recopilación de información sobre los paradigmas MEC y LP-WAN para comprender su funcionamiento individualizado.
- 2- Búsqueda y evaluación distintas arquitecturas que propongan conceptos similares como *fog computing*, *cloudlets*, etc. Estudiar el caso de integraciones similares en la literatura relacionada.
- 3- Instalación y configuración de una arquitectura LP-WAN basada en LoRaWAN.
- 4- Integración de un nodo MEC en la arquitectura LoRaWAN y desarrollo una serie de servicios diversos para enriquecer las capacidades del sistema original.
- 5- Análisis de resultados.

En capítulos posteriores se hará un estudio más profundo de las distintas etapas aquí relacionadas, con especial atención a las etapas de diseño de la arquitectura completa, los distintos servicios habilitados y el despliegue final del sistema, del que extraeremos las conclusiones de este trabajo.

1.3 Entorno de trabajo

El entorno de trabajo elegido para este estudio ha sido totalmente experimental. Es decir, en primer lugar, se desplegó una red real LoRaWAN compuesta por una estación base comercial y un nodo final a bordo de un coche (para agilizar las pruebas realizadas). Ambos elementos fueron conectados a sendas antenas apropiadas para cada uno de los casos, como se explicará en secciones siguientes. Una vez realizado el despliegue de la red de acceso LoRaWAN, se conectó directamente un nodo MEC (computadora Linux) a la estación base para enriquecer al sistema con servicios no provistos de antemano. Todo el desarrollo realizado fue hecho en el lenguaje de programación C. En el Capítulo 3 se presenta una descripción detallada del banco de pruebas empleado.

Finalmente, reseñar que el sistema operativo empleado en todos los elementos del sistema ha estado basado en sistemas de libre distribución Linux. Las ventajas que se obtienen al usar Ubuntu GNU/Linux son:

- Bajo coste. Al ser de libre distribución, no hay que pagar por él.
- Independencia total de cualquier sector privado o empresa. Esto supone poder llevar a cabo la implementación sin las posibles restricciones impuestas por otro sistema operativo privado.
- Seguridad y privacidad. Al disponer siempre del código fuente, siempre se conocerá su funcionamiento interno, se encontrarán y corregirán mucho antes los posibles errores, filtraciones y otros problemas de seguridad

- Adaptabilidad. Las modificaciones y correcciones de posibles errores se realizan de forma inmediata. De esta forma, las aplicaciones están en continua mejora y en proceso de evolución.
- Respeto a los estándares. El uso de software libre y de sistemas abiertos facilita la interoperabilidad, siendo este un aspecto fundamental a la hora de desarrollar protocolos.
- No hay restricción legal de uso. No hay limitación en el número de licencias ni de copias.
- Facilidad en la creación de nuevos desarrollos. Se pueden iniciar nuevos proyectos basados en el código de cualquier programa libre, o adaptarlo, sin necesidad de solicitar autorización al respecto.
- Acceso a multitud de librerías de apoyo de código abierto para realizar diversas operaciones dentro de la implementación.

1.4 Estructura de la memoria

La estructura de este trabajo es la siguiente: en el Capítulo 2 se explora el estado del arte del paradigma MEC, analizando su capacidad de ser aplicado en escenarios IoT. También se muestra el estado del arte relativo a los sistemas LP-WAN, con especial atención al caso de LoRaWAN. La convergencia entre ambos paradigmas y los servicios desplegados en este caso de estudio son evaluados en el Capítulo 3. Los resultados extraídos de las pruebas experimentales son mostrados y discutidos en el Capítulo 4. El Capítulo 5 incluye las conclusiones obtenidas del estudio realizado y las líneas futuras de investigación que se abren tras este trabajo.

Capítulo 2

Paradigmas *Multi-Access Edge Computing* y LP-WAN

2.1 Introducción

En este Capítulo se presenta una revisión del estado del arte relacionado con las dos tecnologías centrales de este trabajo: *Multi-Access Edge Computing* (MEC) y LP-WAN. Ambas tecnologías han recibido gran atención recientemente, por lo que las contribuciones en ambos campos han sido relevantes durante los últimos tiempos. Sin embargo, tal y cómo se comentó en el Capítulo anterior, hasta la fecha no existe ningún trabajo que trate la convergencia de ambos paradigmas, con el objetivo de enriquecer a las redes LP-WAN con las funcionalidades adicionales que presenta el paradigma MEC.

2.2 *Multi-Access Edge Computing*

Este paradigma novedoso propone una reorganización de las arquitecturas de redes de comunicaciones para adaptarlas a la nueva ola de servicios futuros de Internet. Concretamente, el esquema MEC habilita capacidades de computación en la nube cerca de los usuarios o nodos finales, generando un entorno de super baja latencia, alto ancho de banda y acceso en tiempo real a las características de la red de acceso radio (RAN). Estas posibilidades potencian el desarrollo de nuevas aplicaciones, con especial énfasis en aquellas que ofrecen servicios customizados y contextualizados a los usuarios finales. Debido a la novedad de este paradigma, a continuación, diferentes aspectos incluyendo su arquitectura de red, aplicaciones potenciales e iniciativas de estandarización son ampliamente explorados.

2.2.1 Arquitectura de red

Como se explicó anteriormente, los nodos MEC están ubicados entre la RAN y la red de distribución (*backhaul*). Por lo tanto, como se muestra en la Fig. 1.1, se obtiene una arquitectura de cuatro niveles que permite una organización de red que presenta una serie de implicaciones [2], (i) la proximidad entre los nodos MEC y la RAN permite la adquisición de datos en tiempo real de las tecnologías de transmisión de radio, concretamente de sus capas físicas (PHY) y de control de acceso medio (MAC). Como se verá más adelante, esto permite la gestión automática de la RAN, lo que permite también el desarrollo de mecanismos de *network-slicing* [6]; (ii) la diseminación de múltiples nodos MEC en la red difiere de la arquitectura de nube centralizada, lo que permite el desarrollo de servicios distribuidos más robustos; (iii) el bajo tiempo de respuesta de los nodos MEC facilita la implementación de aplicaciones altamente sensibles al retardo; finalmente, (iv) el manejo de información local en cada nodo MEC permite el desarrollo de aplicaciones contextuales y con reconocimiento de ubicación.

En cuanto a las tecnologías de acceso radio (*Radio Access Technologies*, RAT) disponibles para proporcionar conectividad a los dispositivos finales, las posibilidades son múltiples. De esta forma, el nodo MEC adquiere una gran importancia para ayudar a los nodos finales a seleccionar la alternativa más adecuada. Por lo tanto, diversas RAT tales como mmWave, 4G, Wimax, WiFi, Bluetooth, tecnologías basadas en IEEE 802.15.4 (e.g., Zigbee, 6LoWPAN), LP-WAN, entre otras, coexistirán en un escenario altamente heterogéneo. El papel del nodo MEC en este escenario es múltiple; primero, está a cargo de administrar el acceso al preciado medio de transmisión inalámbrico compartido. Por lo tanto, se puede hacer uso de técnicas de segmentación de red para garantizar la asignación eficiente de los recursos de transmisión entre los diversos dispositivos finales dentro de la RAN. La técnica de *network-slicing* permite implementar múltiples redes lógicas en una infraestructura física común, lo que habilita una operación de red personalizada a cada usuario. De este modo, cada red lógica (segmento) presenta una serie de métricas de Calidad de Servicio (QoS) que deben cumplirse; por lo tanto, dependiendo de las características de la aplicación del nodo final, debe asignarse a segmento lógico u otro. Con este fin, los nodos finales deben manifestar sus demandas y las RAT a las que tienen acceso, de modo que el nodo MEC puede ayudar a gestionar la RAN para garantizar que se satisfagan los requisitos de QoS de los nodos finales. Debido a la heterogeneidad de las tecnologías de transmisión, proporcionar a los nodos finales comunicaciones ininterrumpidas (*seamless*) entre varias RATs es crucial para la provisión continua de las futuras aplicaciones de Internet [7]. Para este fin, se necesita una capa común para garantizar la interoperabilidad entre los diferentes tipos de sistemas y redes de acceso implicados. Concretamente, IPv6 se ha adoptado como un nexo para interconectar los dispositivos de IoT con Internet, lo que permite la provisión de servicios continuos [7]. Como se discutirá más adelante, el nodo MEC es una ubicación adecuada para colocar un puente de red que pueda permitir la comunicación directa entre redes externas IPv6 y sistemas IoT. A continuación, se presentan las posibles aplicaciones y servicios que se benefician de las posibilidades potenciadas por el paradigma MEC.

2.2.2 Aplicaciones y Servicios Basados en MEC

2.2.2.1 Delegación de tareas de computación y almacenamiento

Esta es una de las aplicaciones que está recibiendo mayor atención desde la aparición de la arquitectura MEC [8]. Esta aplicación es especialmente relevante en el campo de IoT, donde los nodos finales son dispositivos muy restringidos en sus recursos disponibles. Esta técnica consiste en descargar tareas de almacenamiento o computacionalmente pesadas que un nodo final no puede realizar de forma eficaz en un nodo con recursos suficientes, es decir, un nodo MEC.

Los principales beneficios de emplear la delegación de cómputo son la reducción en el consumo de energía del nodo final y el acortamiento del tiempo de cálculo. Debido a la proximidad del nodo MEC con los nodos finales, los resultados del cálculo pueden devolverse con una latencia muy corta, lo que aumenta el rendimiento y la QoS proporcionada a los usuarios finales. Además, este tipo de aplicaciones implica el intercambio de grandes cantidades de información tanto en el enlace descendente como en el enlace ascendente. Al filtrar las comunicaciones de *big data* o por medio de funciones de agregación de datos, el tráfico pesado soportado por la red central (*core*) puede reducirse notablemente. A su vez, la delegación de tareas de almacenamiento permite reducir la carga en los nodos finales y colocar estas tareas en un dispositivo diseñado para manejar tales actividades. Las posibles aplicaciones que

se puede delegar a los nodos MEC son procesamiento de imágenes y voz, análisis de video, análisis de big data, etc. [9], [10].

2.2.2.2 Optimización del envío de datos y *data-caching*

Estas funciones permiten la optimización de contenidos de distinta naturaleza a los que se puede acceder desde un dispositivo final (por ejemplo, datos, video, web, etc.) con el objetivo de reducir los tiempos de carga y acceso. Para este fin, el nodo MEC toma en consideración múltiples factores como el estado de la RAN, la carga de la red, las características del dispositivo final o el perfil y la ubicación del usuario, entre otros. Por lo tanto, siguiendo este esquema, que amplía el paradigma de las redes de entrega de contenidos (*Content Delivery Network*, CDN), cuando un nodo final solicita un determinado contenido, el sistema se adapta dinámicamente para mejorar la Calidad de Experiencia (*Quality of Experience*, QoE) del usuario final o el rendimiento del dispositivo final. Por lo tanto, estas técnicas también permiten el desarrollo de aplicaciones centradas en el usuario y sensibles al contexto.

Las posibles aplicaciones que encajan bien en esta categoría son el almacenamiento en caché de datos, mejora del rendimiento web, distribución de servicios de video, los servicios de CDN, realidad aumentada, distribución de datos sensibles al contexto, etc. [11]–[13].

2.2.2.3 Servicios para IoT y *Smart Cities*

La gran variedad de aplicaciones impulsadas desde la aparición de los paradigmas IoT y *Smart City* es incuestionable. Estas aplicaciones incluyen redes inteligentes de transporte (*Intelligent Transportation Systems*, ITS), edificios inteligentes y sostenibles, servicios de información pública, monitoreo de condiciones ambientales, videovigilancia o servicios de emergencia, entre muchos otros [14]–[17]. Como se puede ver, los requisitos de procesamiento y ancho de banda de estas aplicaciones son muy diversos, por lo tanto, un nodo MEC puede facilitar la administración y orquestación de todos los elementos necesarios para implementar servicios complejos como los mencionados anteriormente.

Como se indicó anteriormente, IPv6 surge como un habilitador crucial para proporcionar a los usuarios finales capacidades de continuidad de servicio en diferentes espacios inteligentes [7]. Sin embargo, las demandas de IPv6 a nivel de transporte son excesivas para ciertos protocolos IoT, especialmente los que se centran en redes de sensores inalámbricas (*Wireless Sensor Networks*, WSN). Tecnologías como 6LoWPAN, Zigbee o LP-WAN presentan fuertes restricciones con respecto a la longitud de los paquetes que pueden manejar. Teniendo en cuenta la gran sobrecarga introducida por IPv6 y los encabezados de capa superior, se necesitan procedimientos de compresión para traducir los datagramas IPv6 a paquetes más cortos que pueden ser manejados eficientemente por estas tecnologías con capacidad de transmisión restringida [18]. Así, se considera que el nodo MEC puede ser un lugar excelente para realizar estas tareas de traducción a fin de permitir la comunicación directa entre redes IPv6 y sistemas IoT restringidos en sus capacidades de comunicación. Concretamente, cuando un dispositivo final necesita enviar un paquete IPv6 a través del enlace restringido (e.g., LoRaWAN), se puede realizar el siguiente proceso: los paquetes de nivel de aplicación se encapsulan en datagramas de transporte, e.g., UDP (*User Datagram Protocol*). Este protocolo es el más adecuado para este escenario a fin de disminuir la sobrecarga de red sobre los enlaces de capacidad limitada. Luego, los datagramas IPv6 se adaptan mediante un algoritmo de compresión (capa de adaptación). El paquete IPv6 finalmente comprimido se envía

como carga de datos en una trama de nivel físico a través del enlace de radio. La adaptación anterior se revierte al recibir el paquete en el nodo MEC y el paquete IPv6 original se reenvía a través de un enlace normal, probablemente atravesando Internet, hasta llegar al nodo final de destino IPv6, que se encarga de proporcionar el nivel de aplicación del servicio concreto. Este proceso se muestra para el caso específico de emplear LoRaWAN como RAT en la Fig. 2.1. Observar que la eficacia de la capa de adaptación es la clave para una integración adecuada de los servicios basados en IPv6 dentro de la parte final de la red. La RAT adoptada en cada caso determina las restricciones relacionadas con el tamaño de paquete máximo admisible, por lo que se han propuesto diferentes algoritmos de compresión de encabezado IPv6. Por ejemplo, la tecnología 6LoWPAN ya incluye su mecanismo de compresión específico y el IETF (*Internet Engineering Task Force*) también está trabajando en el desarrollo de un mecanismo de encabezado de compresión dedicado a los sistemas LP-WAN [18].

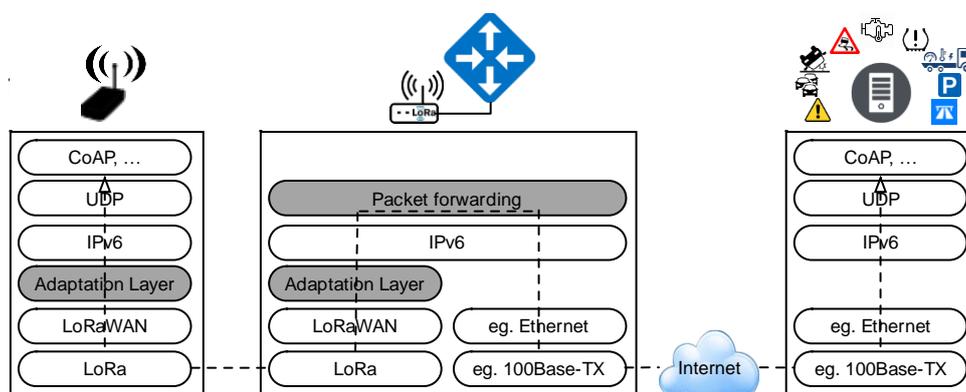


Figura 2.1 Arquitectura de IPv6 sobre LoRaWAN.

2.2.2.4 Gestión de la Red de Acceso (RAN)

Como se discutió anteriormente, la heterogeneidad de las tecnologías de acceso inalámbrico (RAT) disponibles en los dispositivos finales será una característica destacada en la próxima generación de redes IoT. Sin embargo, administrar esta diversidad de tecnologías compitiendo por un medio de transmisión compartido es una tarea compleja, especialmente en escenarios ultra-densos. Por lo tanto, técnicas como la sectorización vertical, las *femtocells* o el *network slicing*, entre otras, han surgido con el objetivo de optimizar la asignación de un recurso escaso como es el espectro inalámbrico [6], [19]. Debido a la proximidad de los nodos MEC a la red final, éstos pueden acceder a la información de la RAN en tiempo real. Por lo tanto, al tener una visión holística de toda la red de acceso les permite controlar los diferentes elementos que componen este ecosistema. En primer lugar, al conocer los recursos disponibles de la red de acceso, los nodos MEC pueden negociar los límites de QoS garantizados con los nodos finales. Además, una vez que se establece la conexión, tanto el estado de la red como los requisitos de la aplicación del nodo final son propensos a cambios, de modo que se debería realizar una renegociación del acuerdo previo con el dispositivo final. Este proceso puede contemplar la posibilidad de posibles saltos entre diferentes RATs en el dispositivo final, que debería ser transparentes para las aplicaciones de capa superior. Estas tareas están relacionadas con los servicios de control de acceso y *network slicing*. Por lo tanto, se puede ver que la virtualización de la gestión de la RAN tendrá una importancia crucial para atender las demandas dinámicas de los nodos que componen la red final de acceso.

2.2.2.5 Estandarización

El ETSI es el organismo de estandarización que ha mostrado un mayor interés en la introducción de la tecnología MEC. No en vano, el “ETSI MEC *Industry Specification Group* (ISG)” se lanzó en 2014 para tratar de proveer unas líneas clave para desarrollar el paradigma MEC. Desde entonces, se han publicado varios documentos para definir la terminología MEC [20], los requisitos técnicos [21], la arquitectura de referencia [22], así como escenarios de aplicación [23]. El proceso de estandarización es un facilitador clave para el desarrollo de servicios innovadores por parte de terceros. En los documentos anteriormente citados, se identifican y definen la plataforma de habilitación de aplicaciones, los servicios MEC, las correspondientes interfaces de programación de aplicaciones (*Application Programming Interfaces*, API) y las métricas de rendimiento clave. Por esa razón, la mayoría de los trabajos que exploran el paradigma MEC toman estos documentos del ETSI como el marco general para definir la arquitectura MEC [8], [24].

Además, el *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) también ha desarrollado algunas iniciativas relacionadas con el paradigma MEC. En concreto, estos esfuerzos se han concentrado en aspectos intermedios, es decir, los mecanismos, protocolos e interfaces, entre la RAN y la infraestructura MEC. El objetivo de estas acciones es lograr una utilización eficiente de los recursos, mejorando la QoE proporcionada a los usuarios finales desde una perspectiva de optimización cruzada en diversas capas.

Por último, la Unión Internacional de Telecomunicaciones - Sector de Normalización de las Telecomunicaciones (UIT-T) aún no ha publicado ninguna recomendación específica que aborde el paradigma del MEC, pero existen algunas recomendaciones y grupos de estudio que abordan otros temas relacionados. Por ejemplo, la Rec. UIT-T Y.3011 e Y.3012 se centran en el paradigma de virtualización de red para redes futuras y el grupo de trabajo UIT-T SG13 está trabajando en los próximos desafíos de 5G.

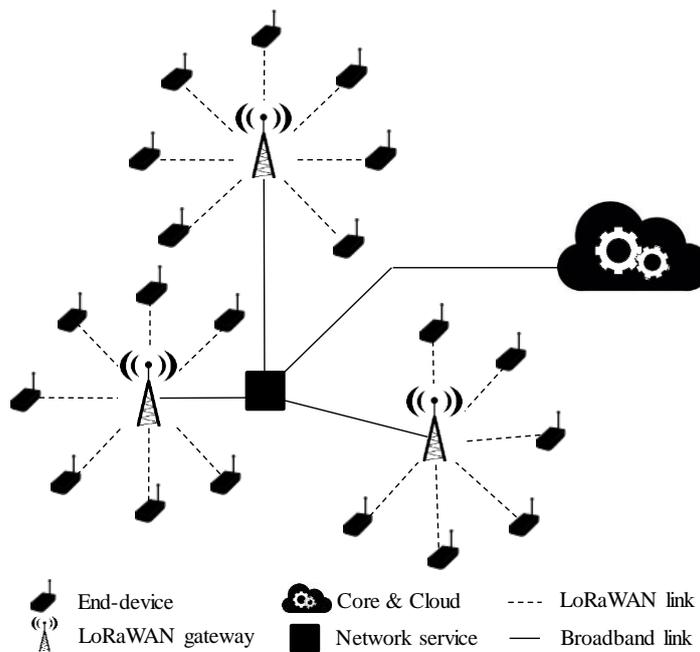


Figura 2.2 Topología de una red LoRaWAN.

2.3 LP-WAN

Esta tecnología está recibiendo la atención de la academia y la industria desde hace poco tiempo debido a sus interesantes características que resultan de gran interés para desplegar redes de sensores formadas por una gran cantidad de dispositivos restringidos distribuidos en áreas muy amplias. Concretamente, las diferentes soluciones que emplean esta tecnología prometen rangos de cobertura de más de 10 km en áreas rurales (4-5 km en escenarios urbanos). Además, una de las características más destacadas es su reducido consumo de energía, lo que permite una duración de la batería de los nodos finales de años. Estos logros se alcanzan mediante las siguientes estrategias: (i) transmisión de datos a muy bajas tasas binarias, (ii) uso de bandas de baja frecuencia (bandas sub-GHz), y (iii) limitación de la capacidad de comunicación de los dispositivos finales (cantidad de mensajes por día).

Las soluciones LP-WAN con mayor relevancia son Sigfox, LoRaWAN, Weightless o Ingenu, entre otras [25]. La mayoría de ellas propone una topología en estrella (o estrella de estrellas) en la que los nodos finales obtienen conectividad directamente a través de una estación base o *gateway* (ver Fig. 2.2). Debido a los largos rangos cubiertos por el nodo central, es factible establecer un enlace directo entre esta estación y los nodos finales. Esto permite evitar la complejidad introducida por las redes multi-salto, las cuales requieren de la utilización de protocolos de enrutamiento, técnicas de sincronización, etc. Por lo tanto, cuando un nodo final tiene algunos datos que enviar, simplemente lo transmite directamente a la estación base, donde los datos son procesados y entregados a la red de distribución (*backhaul*) si es necesario.

2.3.1 LoRaWAN

Como se ha mencionado anteriormente, una de las soluciones LP-WAN que ha recibido mayor atención durante los últimos tiempos es LoRaWAN. Esta plataforma hace uso de la topología de red que se muestra en la Fig. 2.2 (estrella de estrellas). Una característica clave de LoRaWAN es que toda la red de acceso y sus componentes pertenecen al usuario final, es decir, a diferencia de otras soluciones como Sigfox en la que la estación base y la plataforma de procesamiento de datos están gestionadas por la propia empresa Sigfox, en LoRaWAN toda la arquitectura de comunicación y la pila de procesamiento de datos debe ser administrada por el usuario final. Esto confiere una gran flexibilidad al usuario para ajustar la configuración de la red a sus necesidades. LoRaWAN define dos capas bien diferenciadas, la capa física (PHY), definida por la modulación LoRA (*Long Range*) y la capa de acceso al medio (*Medium Access Control*, MAC) definida por el protocolo LoRaWAN. LoRa es un esquema de modulación de espectro ensanchado patentado por la empresa Semtech que se deriva de la modulación *Chirp Spread Spectrum* (CSS). Esta modulación es la base principal de LoRaWAN, que afirma tener características sobresalientes en términos de rangos de transmisión y eficiencia energética que hacen que se ajuste mejor que otras propuestas al ecosistema de IoT [5]. Se debe tener en cuenta que, como la mayoría de las soluciones LP-WAN, LoRaWAN hace uso de bandas de frecuencia Industrial, Científica y Médica (*Industrial, Scientific and Medical*, ISM). Concretamente, emplea las bandas de frecuencia de 868 MHz (Europa) y 900 MHz (América, Asia y Australia). LoRa presenta tres elementos configurables que la hacen altamente flexible frente a diferentes escenarios o condiciones de propagación. Concretamente, el *Spreading Factor* (SF), el *Coding Rate* (CR) y el ancho de banda (*Bandwidth*, BW) son los parámetros potencialmente ajustables. Cada uno de ellos permite ajustar la robustez, velocidad de datos y rango de la comunicación. Por lo tanto, dependiendo del estado actual del nodo final (por ejemplo, adversidad

ambiental, nivel de batería, etc.), estos factores deben ser ajustados con el objetivo de mejorar el rendimiento de la transmisión extremo a extremo.

Con respecto al SF, la modulación de espectro ensanchado se realiza representando cada bit de información por múltiples chips. La longitud de estos chips en comparación con cada bit individual está determinada por el SF. Por lo tanto, valores altos de SF implican una mayor sobrecarga de transmisión con el objetivo de mejorar la fiabilidad del enlace y viceversa. Los valores usuales de SF para LoRa van de 7 a 12. Además, para aumentar adicionalmente la robustez de la transmisión, LoRa emplea la detección y corrección de errores mediante CRC (Cyclic Redundancy Check). Dicha detección de errores incurre en una sobrecarga de transmisión (bits adicionales en el paquete LoRa) que están determinados por el parámetro CR. Los valores posibles para CR en LoRa son 4/5, 4/6, 4/7 y 4/8, indicando el primer número el número de bits de carga útil y el segundo el número total de bits transmitidos. Finalmente, el BW más empleado en la transmisión LoRa es de 125 kHz, aunque también admite anchos de banda de 250 kHz y 500 kHz. Se pueden encontrar más detalles sobre LoRa en [26].

Desde una perspectiva de capa superior, tal y cómo se explicó anteriormente, LoRaWAN organiza la red considerando una topología de estrella (ver Fig. 2.2). Observar que los nodos finales obtienen conectividad con su estación base correspondiente a través de un enlace directo. Debido a las limitaciones energéticas presentadas por los nodos finales, la tecnología LoRaWAN presenta un enlace descendente (transmisiones desde la estación base hacia los nodos finales) muy limitado, por lo que LoRaWAN define tres tipos de dispositivos finales según sus necesidades de descarga: los dispositivos *Clase A* tienen una ventana de descarga programada justo después de cada conexión de enlace ascendente (estrategia de transmisión iniciada por el receptor, bajo consumo de energía), los dispositivos *Clase B* tienen ventanas de enlace descendente programadas (estrategia de escucha coordinada, consumo medio de energía) y los dispositivos *Clase C* pueden recibir mensajes en cualquier tiempo (estrategia de escucha continua, gran consumo de energía). En sus hojas de especificaciones, LoRaWAN afirma tener una vida útil de la batería de los dispositivos finales *Clase A* de más de 10 años [26].

2.3.1.1 Despliegues LoRaWAN

Desde la aparición de esta tecnología, un creciente número de trabajos han sido publicados evaluando sus características y funcionamiento en escenarios reales [27], [28], [37], [29]–[36]. Algunos de ellos han estudiado LoRaWAN de forma analítica con el objetivo de comprender la capacidad de esta tecnología en términos de escalabilidad y el rendimiento de las transmisiones [28]–[30]. Estos estudios han concluido que los sistemas LoRaWAN presentan ciertos problemas para albergar un gran número de nodos en cuanto a la escalabilidad del sistema, por lo que deben ser configurados y dimensionados concienzudamente para poder alojar a un elevado número de dispositivos finales. En este sentido, la arquitectura LoRaWAN-MEC presentada en este trabajo puede ayudar a mejorar la escalabilidad de la red. De forma específica en [28] se analizó el impacto que las interferencias entre transmisiones simultáneas pueden tener en celdas LoRaWAN altamente pobladas. Entre los resultados mostrados, los autores destacaron algunos problemas relacionados con la interferencia entre secuencias de ensanche del espectro, lo cual perjudica sobremanera la escalabilidad de los sistemas LoRaWAN. Por su parte, el trabajo en [29], concluyó que las redes LoRaWAN son válidas para redes ultradensas con requisitos relajados en cuanto a latencia y confiabilidad de las transmisiones. De esta forma, para garantizar la escalabilidad de la red cuando se aloja un alto número de nodos se pueden adoptar dos soluciones diferentes: (i) disminuir el número de

paquetes enviados por nodo durante un periodo determinado o (ii) aumentar el número de estaciones base [30].

Además, otros artículos han planteado mejoras en las características originales de LoRaWAN [31], [32]. En [31] se presenta un mecanismo para mejorar la seguridad general de un sistema de IoT basado en LoRaWAN. Para esta solución, se hace uso de una serie de nodos *proxy* que efectúan las operaciones criptográficas más pesadas con el objetivo de evitar el cómputo pesado en los limitados nodos finales. Esta estrategia está relacionada con el paradigma MEC, tal y como se discutió anteriormente. Por su parte, el trabajo en [14] muestra una integración del protocolo IPv6 dentro de una arquitectura LoRaWAN. Este servicio también fue identificado en la Sección anterior como un punto clave dentro de la arquitectura MEC. Ambos trabajos, aunque interesantes en su planteamiento, no presentan un análisis detallado del desempeño de las soluciones propuestas para demostrar su impacto sobre el funcionamiento de la red original.

Adoptando un enfoque diferente, otros trabajos han presentado los resultados obtenidos en pruebas experimentales de evaluación de prestaciones, efectuadas bajo diversas condiciones y escenarios [33]–[37]. Estos estudios se centran en evaluar el rendimiento de LoRaWAN en distintos escenarios, es decir, bajo condiciones ambientales y de propagación muy diversas. El trabajo en [33] estudió un despliegue real de LoRaWAN y concluyó que la ubicación y elevación de la antena de la estación base tienen un gran impacto en el desempeño de la red. La evaluación se llevó a cabo empleando tres estaciones base distintas. Similar a este trabajo, en [34] se presentó un estudio experimental en el que se evaluó la capa física de LoRaWAN. Así, diferentes parámetros de configuración como los descritos anteriormente fueron modificados y su impacto fue estudiado, identificando tanto SF como la tasa de transmisión como los principales factores que determinan la cobertura de la red de acceso. En [35] se presentó otro estudio de cobertura de un sistema LoRa, sin embargo, en este caso se llevó a cabo en un escenario de interiores (*indoor*). Los resultados permitieron concluir la fiabilidad de la tecnología LoRa en entornos industriales con malas condiciones de propagación, incluso haciendo uso de tasas de transmisión altas. Por su parte, los autores de [18] investigaron la cobertura de un sistema LoRaWAN en diferentes localizaciones mediante la instalación del dispositivo final (mota LoRaWAN) a bordo de un automóvil y un barco. En los resultados se muestran rangos de cobertura de más de 10 km con una tasa de pérdida de paquetes no excesivamente alta. Finalmente, haciendo uso de herramientas de simulación, el trabajo presentado en [27] se centró en la aplicación de LoRaWAN en escenarios vehiculares, estudiando el rendimiento de LoRaWAN en redes vehiculares oportunas, permitiendo un mejor desempeño en comparación con la tecnología WiFi.

Capítulo 3

Convergencia de los paradigmas MEC y LP-WAN

3.1 Introducción

Tal y cómo se ha discutido en el Capítulo anterior, parece claro que los sistemas LP-WAN son muy adecuados para adoptar una arquitectura MEC. El emplazamiento del equipo de acceso radio, por ejemplo, la estación base, *gateway*, etc., es una ubicación privilegiada para ejecutar aplicaciones sensibles al retardo, asumir tareas de descarga de procesamiento/almacenamiento o alojar aquellos servicios que necesitan información en tiempo real de la RAN. Por esa razón, este punto en la red ha sido identificado por diversos autores como ideal para instalar el nodo MEC [24]. Observar que, en ambos casos, es decir LP-WAN y MEC, se conserva su arquitectura de cuatro niveles, por lo que se combinan perfectamente entre sí (consultar la Fig. 1.1 y la Fig. 2.2). Por lo tanto, la arquitectura resultante al combinar ambos paradigmas se muestra en la Fig. 3.1. Se debe tener en cuenta que considerando esta topología, el equipo MEC puede proporcionar las siguientes capacidades a la red LP-WAN: (i) tomar el control del tráfico desde y hacia la red de acceso (RAN), incluido el enrutamiento, la administración del ancho de banda o la compresión del tráfico, entre otras tareas, (ii) recopilar información de la RAN en tiempo real, (iii) apoyar a la gestión de identidades de usuarios, (iv) realizar funciones relacionadas con la gestión de servicios, (v) proporcionar soporte para movilidad de nodos finales, (vi) proporcionar un entorno de virtualización para ejecutar aplicaciones, y (vii) realizar tareas de administración de la tecnologías de acceso radio (RAT). No es necesario que todas estas actividades se implementen en cada nodo MEC, por lo que cada nodo soportará sólo aquellas funciones demandadas por cada caso de uso específico.

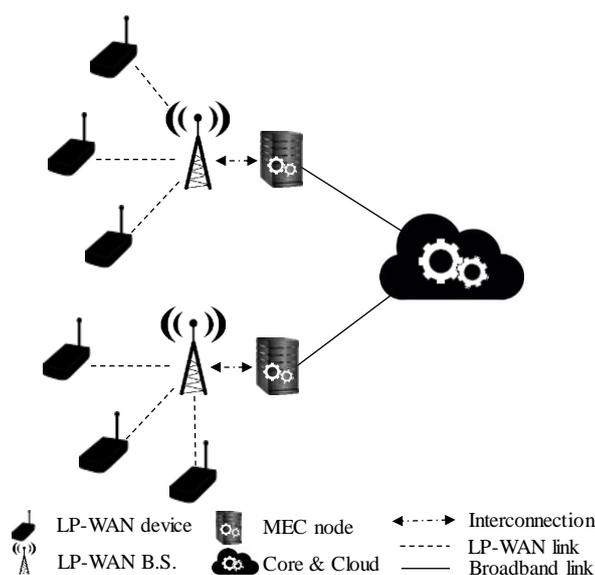


Figura 3.1. Arquitectura de convergencia MEC - LP-WAN.

Teniendo en cuenta las posibles aplicaciones MEC identificadas en el Capítulo 2, algunas de ellas se ajustan bien dentro del ecosistema LP-WAN. Los escasos recursos de los nodos finales que componen este tipo de redes los hacen muy propensos a recibir soporte en muchas tareas, por lo que la convergencia de MEC y LP-WAN es de gran interés para las futuras implementaciones de redes de IoT. La descarga de tareas de procesamiento o de almacenamiento es un claro ejemplo de un servicio que podría aumentar las capacidades de los sistemas LP-WAN: debido a la proximidad de los nodos MEC a los dispositivos finales, éstos podrían recibir los resultados de una tarea determinada inmediatamente después de cargar ciertos datos. Este hecho aumentará la capacidad de reacción contra eventos críticos tales como alarmas de seguridad. De la misma manera, las operaciones más pesadas, como análisis de *big data*, serán situados cerca de la red final de acceso y las decisiones basadas en este procesamiento se transmitirán rápidamente a los nodos finales. Además, el nodo MEC puede proporcionar un servicio de caché de datos para aliviar las necesidades de almacenamiento del dispositivo final. Desde la perspectiva de gestión de la RAN, como el nodo MEC tiene acceso directo a las métricas de las capas PHY y MAC, es un candidato perfecto para realizar esta tarea. Por lo tanto, gestionar la movilidad de los nodos finales, aplicar técnicas de *network-slicing* o ajustar la configuración de la RAT, entre otros, son servicios clave para los sistemas LP-WAN ya que proporcionan flexibilidad y capacidades adicionales. Además, la adaptación de protocolos de Internet estandarizados como IPv6 para cumplir con los estrictos requisitos de las redes LP-WAN también resulta de gran interés para un número importante de sistemas IoT. Estas ventajas están relacionadas con la implementación de espacios inteligentes centrados en el usuario, dentro de diferentes campos de aplicación y dispositivos involucrados, por ejemplo, teléfonos móviles, televisores, casas, granjas, refrigeradores, etc. Todavía no está claro cómo se proporcionarán los servicios sin interrupciones a los usuarios durante el tiempo marco de un día, que implica el cambio de un espacio inteligente a otro, teniendo en cuenta el tiempo dedicado al transporte entre espacios. Sin embargo, el hecho de proporcionar la capacidad de conectividad IPv6 a los dispositivos finales ha sido identificada como un potencial habilitador para el desarrollo de tales espacios inteligentes [38]. Así, muchos campos de estudio como Internet en Vehículos (*Internet of Vehicles*, IoV), casas inteligentes, aplicaciones electrónicas de salud, redes sociales, etc., serán capaces de interactuar entre sí impulsando el desarrollo de la próxima generación de Internet [39].

Siguiendo estas oportunidades identificadas, este trabajo se enfoca en implementar una variedad de servicios que permitan mejorar el desempeño y las capacidades de una red LP-WAN (LoRaWAN). Concretamente, en este estudio, el nodo MEC propuesto alberga cuatro servicios diferentes: (i) un sistema de gestión de la RAN para mejorar el rendimiento de las transmisiones de LoRaWAN; (ii) la comunicación directa entre redes IPv6 externas y los nodos finales LP-WAN, por medio de una implementación real del algoritmo de compresión de la cabecera IPv6 propuesto por el IETF [18]. Además de esta pila de comunicación, se proponen dos servicios distintos: (iii) almacenamiento en memoria caché y agregación de datos para mejorar la eficiencia del envío de datos a la nube, y (iv) un servicio contextual que proporciona a los nodos finales un acceso rápido a datos individualizados y personalizados. Por lo tanto, observar que, al fusionar ambos paradigmas, las redes LP-WAN se enriquecen con un abanico de funcionalidades y aplicaciones novedosas, mientras que continúan beneficiándose de las ventajas que brinda esta particular tecnología de acceso radio.

3.2 Caso de uso. Servicios implementados

Con el objetivo de ejemplificar la arquitectura discutida en secciones anteriores, se ha desplegado una red similar a la que se muestra en la Fig. 3.1 (solo con una estación base). Concretamente, el objetivo de este caso de uso es proporcionar al sistema una serie de servicios que no están disponibles de forma nativa en redes LP-WAN. Como se dijo anteriormente, para el conocimiento de los autores, este es el primer trabajo en el que ambos paradigmas, MEC y LP-WAN, se acoplan entre sí. Algunos trabajos anteriores ya han aplicado el paradigma MEC dentro de los sistemas IoT [40]–[42], sin embargo, la mayoría de ellos se centraron sólo en las funciones de escalado y de descarga/delegación de tareas. Todos estos trabajos presentan resultados extraídos de simulación o de análisis matemático, pero sin proporcionar los resultados de unas pruebas de experimentación real. Además, la gestión de la RAN siguiendo una arquitectura MEC ha sido abordada solo desde una perspectiva teórica en diferentes revisiones del estado del arte [8,32]. A continuación, se examinan los cuatro servicios propuestos para proporcionar una descripción exhaustiva de sus características principales.

3.2.1 Gestión automática de la red de acceso (RAN)

Aprovechando la capacidad del nodo MEC para acceder directamente a las métricas de la capa física de los paquetes recibidos, se ha desarrollado una estrategia de gestión para la red de acceso (RAN). Así, centrándonos en las diferentes tasas de transmisión (*Data Rate*, DR) definidas por el estándar LoRaWAN para un ancho de banda de transmisión de 125 kHz (DR0-DR5) [5], se ha implementado un algoritmo adaptativo para autoajustar el parámetro DR a las condiciones de transmisión reales. El uso de diferentes DRs permite una compensación entre la velocidad la tasa de transmisión y la fiabilidad del enlace. Por lo tanto, DRs altos permiten velocidades de transmisión mayores, pero los paquetes deben recibirse con un nivel de potencia más elevado para su adecuada decodificación. A su vez, los DR de menor valor reducen severamente la tasa binaria, pero la robustez de la transmisión mejora porque la sensibilidad de la interfaz inalámbrica se incrementa notablemente.

Centrándonos en nuestra implementación, el nodo MEC inspecciona los niveles de potencia (*Received Signal Strength Indicator*, RSSI) de los paquetes recibidos por la estación base para encontrar disminuciones en el nivel de potencia de la señal recibida. De esta forma, se ha desarrollado una adaptación automática del modo DR en función del RSSI medido en cada recepción (para obtener información adicional sobre el parámetro DR de LoRaWAN, consulte [5]). Implícitamente, cambiar el DR implica ajustar el SF, por lo tanto, al aumentar el DR, se permite una velocidad de transmisión más alta, pero la sensibilidad del equipo del receptor disminuye, y viceversa. Con esta estrategia, se logra un ajuste automático de los parámetros de la tecnología de acceso radio (RAT) dependiendo de las condiciones de transmisión del nodo final en tiempo real.

El algoritmo adaptativo desarrollado se basa en los valores de RSSI de los últimos tres mensajes recibidos, los cuales se comparan con un intervalo de guarda considerando tanto el suelo de sensibilidad para cada DR (consulte [43]) como un valor de guarda configurable. Si los valores de RSSI de tres paquetes consecutivos son mayores que el intervalo de seguridad calculado, el algoritmo decide aumentar el DR a un valor más alto que el DR empleado en los últimos paquetes recibidos. Por el contrario, si los valores de RSSI de tres paquetes consecutivos son inferiores al intervalo de guarda calculado, el algoritmo decide disminuir el DR un paso. Estos cambios de DR son ordenados al nodo final desde la estación base mediante un

mensaje definido a tal efecto. Como se puede observar, esta estrategia permite la adaptación automática de la configuración de la RAT del nodo final con el objetivo de aumentar la robustez del enlace en caso de condiciones de transmisión adversas.

3.2.2 Integración de IPv6

Como se explicó en secciones anteriores, LoRaWAN no puede asumir la sobrecarga introducida por IPv6 y los encabezados de protocolos de capas superiores. Por esta razón, estos encabezados se deben comprimir antes de insertarlos como *payload* de datos de la trama LoRaWAN. La Fig. 2.1 representa este proceso de encapsulación / descapsulación. En este trabajo se ha adoptado e integrado dentro del nodo MEC la solución propuesta por el grupo de trabajo “*IPv6 over Low Power Wide-Area Networks (lpwan)*” del IETF [18], tomando el software en [44] como punto de partida para el desarrollo. Este algoritmo de compresión, denominado *named Static Context Header Compression (SCHC)*, es un esquema de compresión de cabeceras y de fragmentación para IPv6 y UDP en sistemas LP-WAN. Para este fin, los dispositivos finales y el nodo MEC almacenan un contexto estático común que incluye información que describe los valores posibles de los campos de las cabeceras de los paquetes. El contexto se comparte entre todos los dispositivos que componen el sistema, por ejemplo, de antemano, y no debe cambiar durante la comunicación para asegurar la consistencia del proceso de compresión / descompresión. Concretamente, el contexto se compone de un conjunto de reglas que especifican cómo comprimir / descomprimir los diferentes campos de los encabezados IPv6, ICMPv6 y UDP. La base principal de la estrategia SCHC es que el tráfico LP-WAN es altamente predecible. Por lo tanto, se utiliza un identificador (ID) de regla para reconocer cada regla, por lo tanto, en lugar de enviar el contenido completo del campo, solo el ID de la regla se adjunta al paquete enviado. La regla seleccionada para describir cada flujo de tráfico es la que tenga una mayor coincidencia con los campos de la cabecera y, en consecuencia, logra una mayor compresión. Cada regla también define las acciones necesarias para una descompresión adecuada con el fin de generar un paquete IPv6 válido en recepción a partir de un paquete comprimido con SCHC.

Observar que la integración de IPv6 sobre estos sistemas altamente restringidos abre una extensa gama de oportunidades para desarrollar nuevos servicios aprovechando la conectividad directa entre nodos IPv6 ubicados en redes externas y los dispositivos LP-WAN. Tomando esta arquitectura como base principal, también se propone integrar dentro del nodo MEC los dos servicios siguientes.

3.2.3 Delegación de tareas de almacenamiento y cacheo de datos

Ya se ha explicado anteriormente las altas restricciones presentadas por los nodos finales LP-WAN, que afectan especialmente a sus capacidades de almacenamiento y de procesado. Como resultado, la delegación de ambas tareas en nodos con mayores capacidades resulta de gran utilidad para aliviar a los nodos finales de la realización de estas actividades. En la implementación MEC de este trabajo, se propone un servicio de caché para almacenar y agregar datos periódicamente generados por los nodos LoRaWAN. Por lo tanto, cuando un servicio externo envía una solicitud de datos al nodo final (tener en cuenta que tiene una dirección global IPv6), dicha solicitud es interceptada por el nodo MEC y, dependiendo de las características de la solicitud, ésta podría ser satisfecha en este punto sin tener que llegar la petición al nodo final. Si el nodo MEC no puede satisfacer la solicitud, por

ejemplo, porque los datos disponibles (cacheados) sean demasiado antiguos, la petición se comprime usando el esquema SCHC y, luego, se reenvía al nodo final. Siguiendo esta estrategia, los nodos finales sólo tienen que realizar dos acciones: enviar periódicamente los datos generados al nodo MEC y responder a solicitudes externas excepcionales. El uso de esta arquitectura proporciona los siguientes beneficios: (i) se puede implementar una estrategia más eficiente para compartir los medios de transmisión inalámbricos, lo cual es de gran importancia considerando el largo tiempo de transmisión de los paquetes LoRaWAN [26]; (ii) la demanda de almacenamiento del nodo final se ve reducida; (iii) el procesamiento de los datos, por ejemplo, agregación, análisis, etc., se puede realizar en el nodo MEC; y (iv) se reduce el consumo de energía del nodo final asociado a la transmisión de datos.

3.2.4 Descarga de Información Contextualizada

En muchos escenarios, los nodos finales deben recopilar información de la infraestructura con el objetivo de aumentar la inteligencia del sistema con datos procesados y enriquecidos. A veces, estas solicitudes deben atenderse teniendo en cuenta el contexto o la ubicación del solicitante, por lo tanto, se habilita el despliegue de servicios basados en el contexto o basados en la localización. Siguiendo este paradigma, se propone la integración de este tipo de servicios dentro del nodo MEC con el objetivo de personalizar e incrementar la precisión de la información enviada a los nodos finales. Para ejemplificar esta idea, proponemos un sistema de monitoreo inteligente para edificios energéticamente eficientes que está compuesto por un conjunto de sensores y actuadores distribuidos a lo largo del edificio y un nodo MEC a cargo de su gestión. Este es un escenario que será muy explorado durante los próximos años, ya que la Comisión Europea ha establecido que 16 Estados miembros procederán a la implementación a gran escala de contadores inteligentes para 2020 o antes¹. Los beneficios de aplicar técnicas de control y retroalimentación a la gestión eficiente de edificios, han sido profundamente estudiados en la literatura relacionada, demostrando su impacto económico, implicaciones para la salud y consecuencias ecológicas positivas [45]–[47]. Por lo tanto, se propone el desarrollo de un servicio contextual para ayudar a los actuadores a tomar decisiones inteligentes al administrar las condiciones ambientales de las diferentes instalaciones dentro del edificio. La información recopilada por cada unidad de monitoreo colocada en cada habitación suele ser incompleta para tomar una decisión compleja y coherente que podría mejorar la eficiencia y la habitabilidad del espacio administrado. Por lo tanto, cuando un nodo final necesita decidir si realizar una tarea programada o no, e.g., abrir una ventana o aumentar el nivel de la calefacción, previamente debe solicitar asistencia al nodo MEC sobre esta decisión. El nodo MEC tiene acceso a información contextual más completa, como la futura ocupación de la habitación, la temperatura exterior o el precio de la energía, entre muchos otros factores. De este modo, esta tarea de optimización se mueve al nodo MEC y la decisión adoptada se hace en base a una variedad de información no disponible en los nodos finales. Además, se debe tener en cuenta que este intercambio de información permanece dentro de la organización o dominio del usuario en lugar de reenviarlo a la nube. Diferentes estudios han demostrado que los problemas de privacidad y seguridad son barreras importantes para la adopción definitiva de este tipo de servicios por parte de los usuarios finales [48], [49]. Por lo tanto, siguiendo este enfoque, tanto las empresas como los usuarios mantienen el control de sus datos generados por el sistema de monitoreo. Esta

¹ EC, Benchmarking smart metering deployment in the EU-27 with a focus on electricity. Report from the Commission (2014).

propuesta aún no se ha implementado, por lo que la presentamos para proporcionar un caso de uso realista en la línea de la plataforma presentada en [50] y que atraerá la atención tanto de la industria como del mundo académico en los próximos años.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Introducción

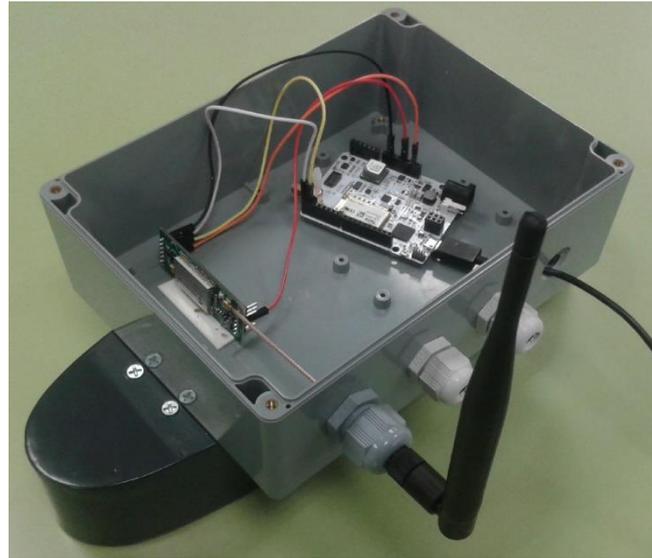
En este Capítulo se muestran los resultados obtenidos al integrar los servicios anteriormente descritos dentro de una red LoRaWAN, a través del despliegue de un nodo MEC conectado directamente a la estación base de la misma.

Además, antes de pasar a la discusión de los citados resultados, también se presenta el equipamiento empleado en las pruebas experimentales realizadas para validar la arquitectura propuesta.

4.2 Banco de Pruebas

Centrándonos en el equipamiento empleado para desplegar el escenario MEC-LP-WAN planteado, cómo ya se ha comentado anteriormente, se ha empleado la tecnología LoRaWAN para ofrecer conectividad a los nodos finales. En este caso, se ha empleado un dispositivo a bordo un coche con el objetivo de probar fácilmente el sistema desplegado en diferentes escenarios. Este dispositivo recibió cobertura a través de una estación base LoRaWAN modelo RisingHF RHF2S008 [51], que incorpora el chip de SX1301 de Semtech [43]. La antena conectada a la estación base fue una antena sectorial, adaptado para funcionar en la banda de 868 MHz (ver figura 4.1(b)), la cual presenta una alta direccionalidad (ancho de haz en campo lejano de 65°) y ganancia de 8 dBi. A su vez, la placa de desarrollo *SmartEverything Fox* fue empleada como nodo final. El microchip LoRaWAN RN2483 fue integrado en esta placa para obtener conectividad LoRaWAN. Además, esta placa aloja un chip GPS (*Global Positioning System*) utilizado para obtener información sobre su ubicación, la cual es enviada como *payload* en el estudio de distancia de transmisión. La antena empleada en el dispositivo final es un modelo típico omnidireccional para este tipo de dispositivos con 2.2 dBi de ganancia (ver Fig. 4.1(a)). Ambos dispositivos, es decir, estación base y nodo final, fueron configurados a una potencia de transmisión de 14 dBm, el máximo de la banda empleada. Con respecto al canal de transmisión, se utilizaron los canales 867.1, 867.3, 867.5, 867.7, 867.9, 868.1, 868.3 y 868.5 MHz porque estaban libres de otras transmisiones durante los experimentos. El canal utilizado por el nodo final se seleccionó al azar para cada transmisión.

Considerando el nodo MEC, éste fue conectado directamente al módulo de la estación base por medio de una conexión *ethernet*. El equipo empleado para implementar el nodo MEC fue un ordenador con una CPU Intel P4 de 3 GHz y de 2,5 GB de memoria RAM corriendo GNU/Linux. La Fig. 4.2 muestra la arquitectura implementada para el banco de pruebas desplegado, caracterizada para un escenario vehicular. Finalmente, las métricas consideradas para evaluar el rendimiento del sistema fueron el RSSI de cada paquete recibido, así como la confiabilidad del enlace, en términos de pérdidas de paquetes y el retardo extremo a extremo.



(a) Detalle del dispositivo final



(b) Detalles de la estación base
Figura 4.1. Equipamiento empleado.

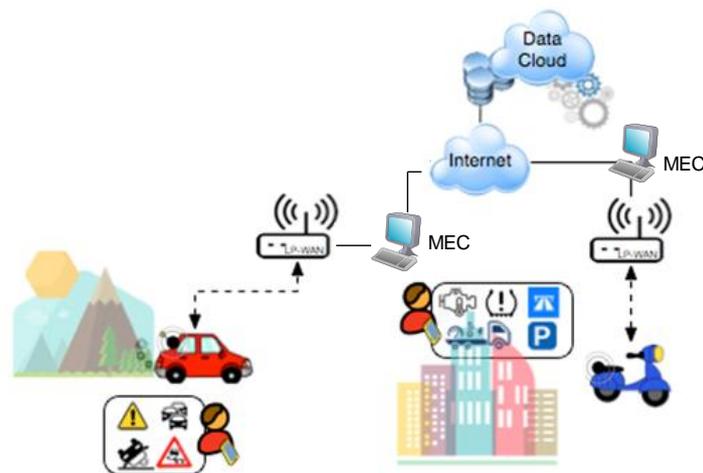


Figura 4.2. Arquitectura propuesta

4.3 Resultados

En primer lugar, se discutirá el funcionamiento del algoritmo de gestión automática de la RAN; así, la Fig. 4.3 presenta la evolución del funcionamiento del algoritmo de adaptación durante los experimentos realizados. Observar la variación del DR con la evolución del RSSI: cuando el nivel de RSSI se encuentra dentro del intervalo de guarda del DR actual (o debajo de él) tres veces consecutivas, el nodo MEC notifica al dispositivo final que disminuya su DR un paso. Por ejemplo, observar este comportamiento alrededor de la muestra 20, en la cual el DR disminuye de DR5 a DR4. A su vez, si el nodo MEC detecta una mejora en las condiciones de transmisión, es decir, se incrementa el RSSI recibido, ordena al dispositivo final que aumente su DR, por ejemplo, alrededor de la muestra 30 ó 50.

Con respecto al rendimiento del sistema cuando se aplica la gestión automática de la RAN basada en procesado MEC, la Fig. 4.4 presenta el nivel de RSSI de los paquetes recibidos por la estación base desde el nodo final. Para comparar una configuración estática DR con la gestión dinámica de DR desde el nodo MEC, la Fig. 4.4 (a) muestra los resultados obtenidos para un experimento en el que el DR se fijó al DR5 de LoRaWAN y la Fig. 4.4 (b) muestra la evolución del RSSI para el caso de emplear el algoritmo adaptativo. Observar que, en el primer caso, existen zonas en las que la estación base no recibió paquetes (puntos grises). Este comportamiento fue motivado por la heterogeneidad del entorno del escenario considerado. Como el escenario estudiado fue un área suburbana, diferentes obstáculos como zonas con arbolado o edificios de mediana altura introdujeron una adversidad extra para las transmisiones. Estos problemas se lograron resolver usando el algoritmo adaptativo tal y como se muestra en la Fig. 4.4 (b) donde las zonas sin cobertura son notablemente reducidas. El algoritmo de autorregulación es capaz de detectar estos cambios en las condiciones ambientales al monitorear el nivel de potencia de los paquetes recibidos, por lo tanto, cuando se detecta una disminución de RSSI peligrosa, el nodo MEC insta al nodo final a disminuir su DR. Por el contrario, cuando las condiciones vuelven a ser favorables, se notifica al nodo final para que aumente su DR. Finalmente, observar como el radio de transmisión se incrementa (alrededor de 1.5 km) al usar la propuesta adaptativa. Al disminuir el DR del nodo final, se incrementa la fiabilidad de las transmisiones, por lo que la estación base necesita un nivel de potencia recibida inferior para decodificar correctamente los paquetes que le llegan desde el nodo final, por lo que se puede concluir que el rendimiento general del sistema mejora aplicando esta estrategia de gestión de la RAN desde el nodo MEC.

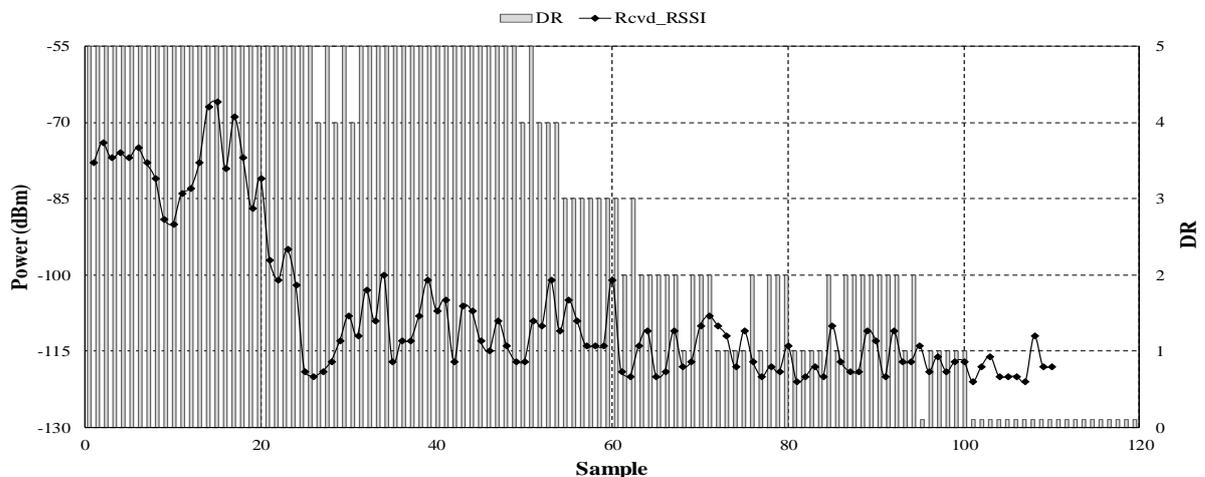


Figura 4.3. Funcionamiento del algoritmo adaptativo: variación del DR con respecto al RSSI recibido.



(a) DR5 fijo



(b) Ajuste dinámico de DR

Figura 4.4. Nivel de RSSI registrado por la estación base para cada paquete recibido desde el nodo final. Los puntos en gris representan paquetes perdidos.

Centrándonos en la integración de IPv6 sobre el sistema LoRaWAN, aunque esta implementación ha servido como base para desarrollar los servicios de capa superior descritos en secciones anteriores, también se ha realizado una caracterización del tiempo de ida y vuelta (*Round Trip Time*, RTT) para las comunicaciones IPv6 extremo a extremo. Para este fin, se ha empleado la aplicación de ping ICMPv6 para evaluar el RTT existente entre un nodo conectado a una red IPv6 externa, en este caso Internet, y un nodo LoRaWAN a bordo de un vehículo siguiendo la misma ruta que en el experimento anterior (Fig. 4.4). En esta prueba, el nodo situado en la red externa envió periódicamente solicitudes ICMPv6 al nodo LoRaWAN, el cual envió automáticamente las respuestas ICMPv6 correspondientes. Con el objetivo de tener condiciones de modulación constantes, la velocidad de transmisión se fijó en una configuración típica de DR2 (SF = 10) [5]. Recordar que las Solicitudes / Respuestas ICMPv6 fueron comprimidas / descomprimidas mediante el algoritmo SCHC detallado anteriormente, proceso que permite la comunicación directa entre ambos puntos finales. La Fig. 4.5 muestra el RTT obtenido en este experimento, que presenta un valor medio de 920 ms (intervalo de confianza de 4,8 ms, $\alpha = 0,05$, 200 muestras). Observar que este valor es muy alto en comparación con otras tecnologías de transmisión, e.g., ethernet o WiFi, y está determinado por los altos tiempos en el

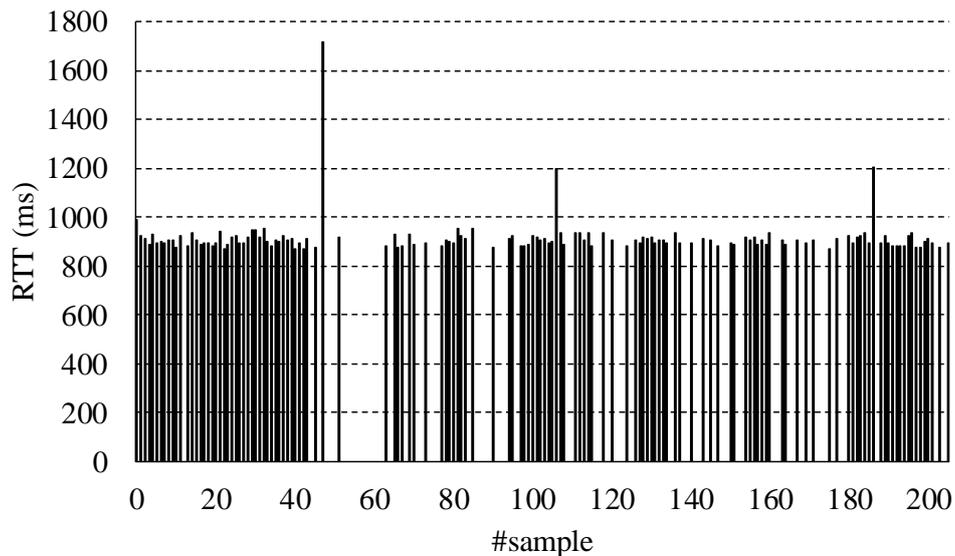


Figura 4.5. RTT obtenido para el test basado en ping ICMPv6.

aire de los paquetes causados por la baja tasa de transmisión de LoRa (del orden de bits por segundo). No obstante, aplicaciones sin requerimientos críticos de baja latencia pueden asumir estos valores altos de RTT, a cambio del resto de ventajas proporcionadas por las tecnologías LP-WAN y la integración del protocolo IPv6 sobre ellas.

Con respecto a la aplicación de cacheo de datos, como se explicó anteriormente, el esquema desarrollado consiste en un solicitante ubicado en una red externa que solicita datos específicos directamente al nodo LoRaWAN a través de su dirección IPv6 asignada. Esta solicitud pasa previamente por el nodo MEC, que la analiza y decide si la solicitud puede ser satisfecha por él mismo o no. Si es así, el propio nodo MEC envía los datos requeridos de vuelta al solicitante; en otro caso, el nodo MEC aplica el procedimiento SCHC y reenvía la solicitud al nodo final, que procesa y responde al solicitante a través del nodo MEC. Con el objetivo de presentar la eficacia de esta estrategia, la Fig. 4.6 muestra el RTT y el porcentaje de paquetes enviados con éxito (*Packet Delivery Ratio*, PDR) obtenidos en ambos casos con el dispositivo final a una distancia fija de 1 km de la estación base y utilizando la tasa de transmisión DR2 de LoRaWAN. Los resultados obtenidos certifican: i) el menor tiempo de respuesta del nodo MEC en comparación con el que necesita el nodo final, y ii) una cierta probabilidad de pérdida de paquetes (*Packet Loss Ratio*, PLR) cuando se transmiten la petición y el dato a través del enlace LoRaWAN. Centrándonos en el primer caso, observar que el prolongado tiempo de transmisión requerido para enviar cada mensaje LoRa causa un alto retardo de transmisión. Por esa razón, el acceso directo al nodo final debe hacerse exclusivamente en casos altamente justificados porque la ocupación del canal es notable, con el riesgo de perjudicar otras transmisiones simultáneas. Concretamente, tal y cómo se representa en la Fig. 4.6, cuando el nodo final está a cargo de procesar la solicitud, el solicitante recibe la respuesta después de 875 ms (intervalo de confianza de 2,3 ms, $\alpha = 0,05$, 1000 muestras), mientras que cuando la solicitud es atendida por el nodo MEC, el RTT es de 7,5 ms (intervalo de confianza de 0,65 ms, $\alpha = 0,05$, 1000 muestras). Con respecto al PDR, aún en condiciones favorables, es inevitable un cierto PLR, 5% en este caso. Para proporcionar más información sobre la confiabilidad del enlace LoRaWAN, se ha realizado una prueba nomádico (cambiando de ubicación, pero realizando las pruebas en parado) empleando la tasa DR0 de LoRaWAN (la más robusta) en los diferentes puntos fijos que se muestran en la Fig. 4.7. Estos puntos de muestreo se han caracterizado por su distancia con respecto a la estación base. El PDR obtenido en estas ubicaciones se representan en la Fig. 4.8 que, para fines comparativos, también

presenta los resultados cuando se utiliza el nodo MEC atendiendo a las peticiones. Observe que la fiabilidad de las transmisiones LoRaWAN está claramente condicionada por la distancia entre ambos puntos finales. Además, las condiciones no estables de los medios de propagación inalámbricos también son un factor importante que impacta directamente en el rendimiento del sistema [37]. Con respecto a los resultados presentados (Fig. 4.8), se observa cómo la robustez del sistema decae con la distancia. Desde distancias superiores a 5 km (P.5) entre la estación base y el nodo final, el PDR comienza a descender hasta el rango máximo de 8 km (P.8) donde no se recibieron paquetes. Sin embargo, como la conexión con el nodo MEC se realizó a través de un enlace confiable, se logró una conectividad perfecta, por lo que se puede concluir que este elemento proporciona una robustez y fiabilidad extra al sistema. Finalmente observar que, al implementar el servicio de cacheo de datos, la información proporcionada por el nodo MEC pueden pre-procesarse o agregarse previamente antes de su reenvío al solicitante, por lo que los datos enviados pueden optimizarse o personalizarse teniendo en cuenta cada solicitud específica.

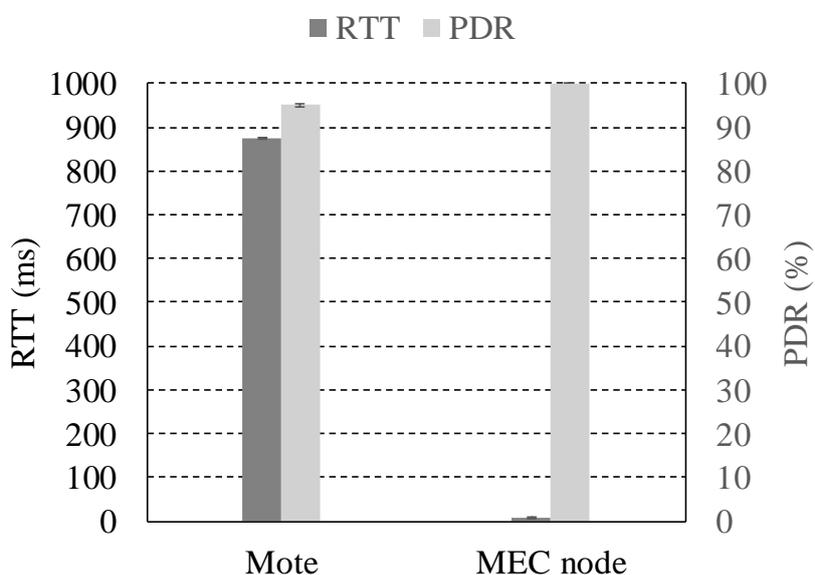


Figura 4.6. Comparación del RTT y PDR obtenidos en el servicio de cacheo de datos. Resultados extraídos de un escenario con el nodo final fijo a 1 km de la estación base.



Figura 4.7. Escenario y puntos de maestro para el test nomádico.

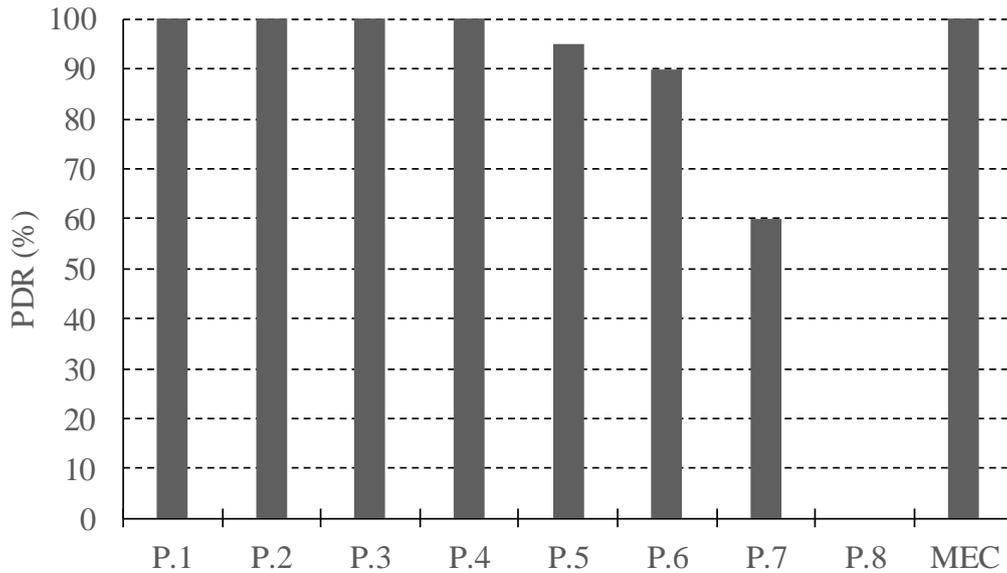


Figura 4.8. PDR obtenido para distintos puntos fijos de muestreo entre el nodo final y la estación base.

4.4 Conclusión

En este capítulo, se ha presentado un caso de estudio en el que varios servicios han sido integrados en una red LP-WAN (LoRaWAN en este caso) mediante el uso de un nodo MEC. Concretamente, en el caso de estudio presentado se han considerado los siguientes servicios: (i) gestión de la red de acceso (RAN) basada en la autoadaptación de la misma a las condiciones de transmisión reales del nodo final, (ii) traductor (compresor / descompresor) para habilitar la conectividad IPv6 entre los nodos finales LP-WAN y redes IPv6 externas, (iii) delegación de tareas de almacenamiento y cacheo / agregación de datos, y (iv) acceso rápido a datos contextualizados desde los nodos finales. De este modo, aprovechando el primer servicio, los resultados presentados mostraron un rendimiento mejorado del sistema, evitando zonas sin cobertura y aumentando el rango de transmisión. La integración de IPv6 se empleó como un nexo común entre los nodos finales LP-WAN y aplicaciones externas. A partir de este último, se ha desplegado un servicio de cacheo de datos que permite reducir retardos de respuesta y disminuir el consumo de energía de los nodos finales. Finalmente, se ha presentado y examinado una descripción de un caso de uso realista que considera una plataforma inteligente para mejorar la eficiencia energética en los edificios. Dentro de esta arquitectura, se ha propuesto un servicio de obtención de información contextualizada para los nodos finales y se han discutido las ventajas proporcionadas por este enfoque.

A la vista de los resultados obtenidos, se puede afirmar que la introducción de un nodo MEC dentro de una arquitectura LP-WAN abre un abanico de posibilidades y nuevos servicios a estos sistemas. Se considera que la estación base del sistema LP-WAN es un emplazamiento óptimo para situar un nodo MEC ya que, de esta forma, se puede procesar el tráfico desde / hacia la red LP-WAN. Esta convergencia tendrá gran auge en el futuro, sobre todo considerando la llegada de la tecnología 5G que ya considera el *Multi-Access Edge Computing* como uno de sus pilares clave.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1 Objetivos logrados

En este trabajo, se han explorado dos novedosos habilitadores para el creciente ecosistema de IoT. Primero, el foco se ha fijado en el paradigma de *Multi-Access Edge Computing* (MEC). La ubicación de la capacidad de procesamiento y almacenamiento entre la red de acceso (RAN) y la red de distribución (*backhaul*) abre una puerta para el desarrollo de una nueva serie de servicios y aplicaciones. De esta forma, al emplear esquemas inteligentes de distribución de tareas, el procesamiento más pesado puede ser repartido entre los diferentes niveles de la arquitectura de la red, es decir, dispositivos finales, nodos MEC y servidores en la nube. En consecuencia, el intercambio de datos está más optimizado y la red central (*core*) no está sobrecargada con gran cantidad de tráfico. Además, muchas aplicaciones de requerimientos críticos pueden aprovechar la baja latencia proporcionada por los nodos MEC a los dispositivos finales debido a su mutua proximidad. Otra característica crucial de los nodos MEC es su capacidad de tener acceso en tiempo real a las condiciones de la RAN, lo que se habilita una gestión adecuada y eficiente de los enlaces inalámbricos para mejorar el rendimiento de las conexiones con los nodos finales.

Después, también se ha estudiado el paradigma LP-WAN. Esta novedosa tecnología de transmisión permite comunicaciones de largo alcance con muy bajo consumo de energía. Estas características son muy valoradas en sistemas con nodos finales altamente limitados. En particular, el foco se centró en LoRaWAN, una de las plataformas LP-WAN más prometedoras, por lo que se examinaron sus principales características, así como sus ventajas y desventajas. Además, se discutió la convergencia de ambos paradigmas, MEC y LP-WAN, y se identificaron como muy prometedoras las sinergias generadas a partir de su interacción para implementaciones IoT en el futuro.

Finalmente, se ha desarrollado un caso de estudio con una integración real de un nodo MEC en una red LP-WAN. Se han propuesto cuatro servicios tipo a ser implementados, llevando a cabo el desarrollo y evaluación de tres de ellos en un despliegue de red experimental.

Como hemos analizado a lo largo de este documento los objetivos que se plantearon al principio de desarrollo de este trabajo fueron:

- 1- Recopilación de información sobre los paradigmas MEC y LP-WAN para comprender su funcionamiento individualizado.
- 2- Búsqueda y evaluación distintas arquitecturas que propongan conceptos similares como *fog computing*, *cloudlets*, etc. Estudiar el caso de integraciones similares en la literatura relacionada.
- 3- Instalación y configuración de una arquitectura LP-WAN basada en LoRaWAN.
- 4- Integración de un nodo MEC en la arquitectura LoRaWAN y desarrollo una serie de servicios diversos para enriquecer las capacidades del sistema original.
- 5- Análisis de resultados.

Consideramos que todos los objetivos se han cumplido con creces, obteniendo unos resultados que aportan información de interés en cuanto a la planificación e implantación de sistemas MEC dentro de redes LP-WAN (o en IoT en general). De esta forma, se abre una nueva vía altamente interesante a continuar explorando dentro del paradigma IoT.

5.2 Conclusiones finales y líneas futuras

Este trabajo se ha centrado en evaluar el resultado de una integración de dos paradigmas de red bien novedosos: LP-WAN y MEC. La primera conclusión que extraemos de esta interacción es el potencial de la arquitectura MEC para enriquecer las redes LP-WAN con una serie de servicios no disponibles hasta ahora. Dado el exponencial crecimiento que están teniendo las redes IoT y las escasas capacidades de los nodos finales, resulta muy interesante dotar a la red con un potencial extra que habilite el desarrollo de nuevas aplicaciones que darán soporte a los nodos finales como, mejorando la calidad de los servicios ofrecidos a los usuarios de estas redes. Desde el punto de vista de implementación, se ha aprendido a manejar una estación base LoRaWAN y a configurar los nodos finales. De este despliegue se puede concluir la gran robustez de las transmisiones LoRaWAN en escenarios adversos, lo cual permitirá el desarrollo de redes IoT en emplazamientos donde actualmente se consideraba muy complicado. Al hacer converger ambas tecnologías, MEC y LP-WAN, hemos podido extraer la conclusión más importante de este trabajo: la interacción entre tecnologías o paradigmas que por separado ofrecen grandes características hacen que el nuevo sistema generado gane en una riqueza y potencial que permitirá el desarrollo de aplicaciones y servicios no imaginados hasta la fecha, sobre todos aquellos relacionados con *big data*, servicios personalizados y/o contextualizados, etc.

Además, pensamos que este trabajo sólo es un primer paso que deja una línea de investigación abierta, que permita continuar con el desarrollo de sistemas IoT en entornos reales. En concreto, una línea de trabajo clara puede centrarse en desarrollar aún más los servicios proporcionados por la arquitectura MEC, como la gestión inteligente de una RAN compleja, por ejemplo, permitiendo la coexistencia de diferentes RAT. Otra línea de investigación futura interesante es la integración de una pila completa de IPv6, incluyendo protocolos estandarizados de la capa de aplicación, como CoAP (*Constrained Application Protocol*) o MQTT (*Message Queue Telemetry Transport*).

Referencias

- [1] M. R. Palattella *et al.*, "Internet of Things in the 5G era: Enablers, architecture, and business models," *IEEE Consum. Electron. Mag.*, vol. 34, no. 3, pp. 510–527, Mar. 2016.
- [2] A. Ahmed and E. Ahmed, "A survey on mobile edge computing," in *10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*, 2016, pp. 1–8.
- [3] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low Power Wide Area Networks: An Overview," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, 2017.
- [4] "LoRa-Alliance." [Online]. Available: <https://www.lora-alliance.org/>. [Accessed: 21-Jun-2017].
- [5] LoRa-Alliance, "LoRaWAN specification," 2015.
- [6] Nokia, "Dynamic end-to-end network slicing for 5G," *White Pap.*, 2016.
- [7] J. Santa, F. Pereniguez-Garcia, F. Bernal, P. J. Fernandez, R. Marin-Lopez, and A. F. Skarmeta, "A framework for supporting network continuity in vehicular IPv6 communications," *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.*, vol. 6, no. 1, pp. 17–34, 2014.
- [8] T. Taleb, K. Samdanis, B. Mada, H. Flinck, S. Dutta, and D. Sabella, "On Multi-Access Edge Computing: A Survey of the Emerging 5G Network Edge Cloud Architecture and Orchestration," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1657–1681, 2017.
- [9] S. Abdelwahab, B. Hamdaoui, M. Guizani, and T. Znati, "Replisom: Disciplined tiny memory replication for massive IoT devices in LTE edge cloud," *IEEE Internet Things J.*, vol. 3, no. 3, pp. 327–338, Jun. 2016.
- [10] M. T. Beck, S. Feld, A. Fichtner, C. Linnhoff-Popien, and T. Schimper, "ME-VoLTE: Network functions for energy-efficient video transcoding at the mobile edge," in *18th International Conference on Intelligence in Next Generation Networks*, 2015, pp. 38–44.
- [11] E. Zeydan *et al.*, "Big data caching for networking: moving from cloud to edge," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 9, pp. 36–42, Sep. 2016.
- [12] S. Retal, M. Bagaa, T. Taleb, and H. Flinck, "Content delivery network slicing: QoE and cost awareness," in *IEEE ICC'17*, 2017.
- [13] S. Nunna *et al.*, "Enabling real-time context-aware collaboration through 5G and mobile edge computing," in *12th International Conference on Information Technology - New Generations*, 2015, pp. 601–605.
- [14] A. Guillen-Perez, R. Sanchez-Iborra, M.-D. Cano, J. C. Sanchez-Aarnoutse, and J. Garcia-Haro, "WiFi networks on drones," in *ITU Kaleidoscope: ICTs for a Sustainable World (ITU WT)*, 2016, pp. 1–8.
- [15] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, and L. Xu, "Edge Computing: Vision and Challenges," *IEEE Internet Things J.*, vol. 3, no. 5, pp. 637–646, Oct. 2016.
- [16] M. Satyanarayanan *et al.*, "Edge analytics in the Internet of Things," *IEEE Pervasive Comput.*, vol. 14, no. 2, pp. 24–31, Apr. 2015.
- [17] O. K. Tonguz and W. Viriyasitavat, "A self-organizing network approach to priority management at intersections," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 6, pp. 119–127, Jun. 2016.
- [18] IETF, "LPWAN Static Context Header Compression (SCHC) and fragmentation

- for IPv6 and UDP,” 2017.
- [19] C. Bouras and G. Diles, “Coordination strategy for dense 5G femtocell deployments,” in *8th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*, 2016, pp. 1–5.
 - [20] ETSI MEC GS 001, “Mobile Edge Computing (MEC); Terminology v1.1.1,” 2016.
 - [21] ETSI MEC GS 002, “Mobile Edge Computing (MEC); Technical requirements v1.1.1,” 2016.
 - [22] ETSI MEC GS 003, “Mobile Edge Computing (MEC); Framework and reference architecture,” 2016.
 - [23] E. M.-I. G. 004, “Mobile Edge Computing (MEC); Service scenarios V1.1.1,” 2016.
 - [24] D. Sabella, A. Vaillant, P. Kuure, U. Rauschenbach, and F. Giust, “Mobile-Edge Computing Architecture: The role of MEC in the Internet of Things,” *IEEE Consum. Electron. Mag.*, vol. 5, no. 4, pp. 84–91, Oct. 2016.
 - [25] R. Sanchez-Iborra and M.-D. Cano, “State of the art in LP-WAN solutions for industrial IoT services,” *Sensors*, vol. 16, no. 5, p. 708, 2016.
 - [26] LoRa-Alliance, “A technical overview of LoRa and LoRaWAN,” *White Pap.*, 2015.
 - [27] J. Herrera-Tapia *et al.*, “Evaluating the use of sub-gigahertz wireless technologies to improve message delivery in opportunistic networks,” in *14th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, (ICNSC 2017)*, 2017.
 - [28] O. Georgiou and U. Raza, “Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?,” *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 6, no. 2, pp. 162–165, Apr. 2017.
 - [29] K. Mikhaylov, J. Petäjäjärvi, and T. Hänninen, “Analysis of the capacity and scalability of the LoRa wide area network technology,” in *22th European Wireless Conference*, 2016, pp. 1–6.
 - [30] D. Bankov, E. Khorov, and A. Lyakhov, “On the limits of LoRaWAN channel access,” in *International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT)*, 2016, pp. 10–14.
 - [31] S. Naoui, M. E. Elhdhili, and L. A. Saidane, “Enhancing the security of the IoT LoraWAN architecture,” in *International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wired and Wireless Networks (PEMWN)*, 2016, pp. 1–7.
 - [32] P. Weber, D. Jackle, D. Rahusen, and A. Sikora, “IPv6 over LoRaWAN,” in *3rd International Symposium on Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, 2016, pp. 75–79.
 - [33] T. Petric, M. Goessens, L. Nuaymi, L. Toutain, and A. Pelov, “Measurements, performance and analysis of LoRa FABIAN, a real-world implementation of LPWAN,” in *IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2016, pp. 1–7.
 - [34] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, “A study of LoRa: Long Range & low power networks for the Internet of Things,” *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1466, 2016.
 - [35] J. Haxhibeqiri, A. Karaagac, F. Van den Abeele, W. Joseph, I. Moerman, and J. Hoebeke, “LoRa indoor coverage and performance in an industrial environment: Case study,” in *22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2017, pp. 1–8.

- [36] J. Petäjäjarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen, and M. Pettissalo, "On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology," in *14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, 2015, pp. 55–59.
- [37] J. Petäjäjärvi, K. Mikhaylov, M. Pettissalo, J. Janhunen, and J. Linatti, "Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage," *Int. J. Distrib. Sens. Networks*, vol. 13, no. 3, pp. 1–16, Mar. 2017.
- [38] J. Santa and P. J. Fernández, "Seamless IPv6 connectivity for two-wheelers," *Pervasive Mob. Comput.*, vol. 42, pp. 526–541, Dec. 2017.
- [39] A. Morelli, M. Tortonese, C. Stefanelli, and N. Suri, "Information-Centric Networking in next-generation communications scenarios," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 80, pp. 232–250, Feb. 2017.
- [40] K. Zhang *et al.*, "Energy-efficient offloading for mobile edge computing in 5G heterogeneous networks," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 5896–5907, 2016.
- [41] C. You and K. Huang, "Multiuser resource allocation for mobile-edge computation offloading," in *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2016, pp. 1–6.
- [42] D. Satria, D. Park, and M. Jo, "Recovery for overloaded mobile edge computing," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 70, pp. 138–147, 2017.
- [43] Semtech, "SX1301 datasheet," 2017.
- [44] T. Lagos, "No Title." [Online]. Available: https://github.com/tlagos1/LoRA_IPv6_implementation. [Accessed: 01-09-2017].
- [45] N. Mogles *et al.*, "How smart do smart meters need to be?," *Build. Environ.*, vol. 125, pp. 439–450, Nov. 2017.
- [46] R. Missaoui, H. Joumaa, S. Ploix, and S. Bacha, "Managing energy Smart Homes according to energy prices: Analysis of a building energy management system," *Energy Build.*, vol. 71, pp. 155–167, Mar. 2014.
- [47] E. Carrascal, I. Garrido, A. J. Garrido, and J. M. Sala, "Model predictive control for the heating system of a public building," in *World Automation Congress (WAC)*, 2014, pp. 433–438.
- [48] E. Zeng, S. Mare, and F. Roesner, "End user security and privacy concerns with smart homes," in *Thirteenth Symposium on Usable Privacy and Security (SOUPS 2017)*, 2017, pp. 65–80.
- [49] N. Apthorpe, D. Reisman, and N. Feamster, "A smart home is no castle: Privacy vulnerabilities of encrypted IoT traffic," *arXiv Prepr.*, no. arXiv:1705.06805, May 2017.
- [50] F. Terroso-Saenz, A. González-Vidal, A. P. Ramallo-González, and A. F. Skarmeta, "An open IoT platform for the management and analysis of energy data," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, Sep. 2017.
- [51] RisingHF, "RHF2S008P4G." [Online]. Available: http://www.risinghf.com/#/product-details?product_id=2&lang=en. [Accessed: 20-05-2018].