

# Análisis de sistemas IoT en entorno agrícola

## Comparación entre LoRa y GPRS



**Enrique Antonio Payán  
Rodríguez**

Máster Universitario en  
Ingeniería de  
Telecomunicación  
Sistemas de Comunicación

**Tutor/a de TF**

Rubén Molina Casasnovas

**Profesor/a responsable de  
la asignatura**

Carlos Monzo Sánchez

Junio 2023

Universitat Oberta  
de Catalunya



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-  
NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

# Ficha del Trabajo Final

<b>Título del trabajo:</b>	Análisis de sistemas en un entorno IoT enfocado a la agricultura
<b>Nombre del autor/a:</b>	Enrique Antonio Payán Rodríguez
<b>Nombre del Tutor/a de TF:</b>	Rubén Molina Casasnovas
<b>Nombre del/de la PRA:</b>	Carlos Monzo Sánchez
<b>Fecha de entrega:</b>	06/2023
<b>Titulación o programa:</b>	Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación
<b>Área del Trabajo Final:</b>	Sistemas de Comunicación
<b>Idioma del trabajo:</b>	Castellano
<b>Palabras clave</b>	IoT, agricultura, sistemas, LoRa, GPRS, redes celulares, bajo consumo, LPWAN.
<b>Resumen del Trabajo</b>	
<p>Dentro de los sistemas IoT disponibles, en el campo de la agricultura son comunes aquellos que tienen una gran distancia de operación. Esto se debe a que el escenario de implementación se trata de grandes superficies, en las que los dispositivos están distanciados del lugar donde se procesan los datos, ya sea la nube o el receptor conectado a la red.</p> <p>En este caso, la empresa en la que trabajo se dedica a procesar datos de cultivos e instalaciones en campo abierto. Por tanto, los escenarios de comunicación están limitados a sistemas LPWAN o redes celulares tradicionales, debido a no disponer de centros específicos ni conexionado directo a internet en los emplazamientos.</p> <p>Por ello, este trabajo engloba una comparativa entre dos sistemas LPWAN: GPRS y LoRa. Se propondrá un escenario en específico para cada sistema, ya que difieren a la hora de recolección de los datos. Todo esto servirá para realizar una comparación en términos de metodología de paso de mensajes, consumo de batería o latencia de envío de las medidas a la base de datos.</p>	

**Abstract**

Within the available IoT systems, in the field of agriculture, those that have a long operating distance are common. This is because the deployment scenario involves large surfaces, in which the devices are distanced from the place where the data is processed, whether the cloud or the receiver connected to the network.

In this case, the company I work for is dedicated to processing data on crops and facilities in the open field. Therefore, the communication scenarios are limited to LPWAN systems or traditional cellular networks, due to not having specific centers or direct connection to the Internet in the locations.

Therefore, this work includes a comparison between two systems: GPRS and LoRa. A specific scenario will be proposed for each system, since they differ when collecting data. All this will serve to make a comparison in terms of message passing methodology, battery consumption or latency of sending the measurements to the database.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto y justificación del Trabajo	1
1.2. Objetivos del Trabajo	2
1.3. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad	2
1.4. Enfoque y método seguido	3
1.5. Planificación del Trabajo	3
1.6. Breve resumen de productos obtenidos	6
1.7. Breve descripción de los otros capítulos de la memoria	6
<b>2. Estado del arte</b>	<b>7</b>
2.1. Introducción al IoT	7
2.2. Arquitectura básica	8
2.3. Protocolos de comunicación del IoT	10
2.3.1. Protocolos de aplicación	11
2.3.2. Protocolos de descubrimiento de servicios	12
2.3.3. Protocolos de infraestructura	13
2.3.4. Protocolos influyentes	14
2.4. Elementos del IoT	14
2.4.1. Identificación	14
2.4.2. Detección	15
2.4.3. Comunicación	15
2.4.4. Computación	16
2.4.5. Servicios	16
2.4.6. Semántica	17
<b>3. Tecnologías de conectividad IoT</b>	<b>18</b>
3.1. Tecnologías de largo alcance	18
3.1.1. LoRa: Long Range	18
3.1.2. GPRS	19
3.1.3. LTE-M	19
3.1.4. SigFox	20
3.1.5. NB-IoT	20
3.2. Tecnologías de corto alcance	21
3.2.1. WiFi	21
3.2.2. ZigBee	21
3.2.3. Bluetooth	22
<b>4. Sistemas en estudio</b>	<b>24</b>
4.1. Sistema LoRa	24

4.1.1. Esquema de comunicació	24
4.1.2. Diagrama de paso de datos	26
4.2. Sistema GPRS	28
4.2.1. Esquema de comunicació	28
4.2.2. Diagrama de paso de datos	30
4.3. Dispositivos utilizados	31
4.3.1. Sensor MEC10	31
4.3.2. Sensor de temperatura y humedad	32
4.3.3. Pruebas realizadas	33
<b>5. Resultados</b>	<b>34</b>
5.1. Escenario LoRa	34
5.1.1. Comprobación del funcionamiento del sistema	34
5.1.2. Nivel de señal	36
5.1.3. Duración de las iteraciones	38
5.1.4. Tiempo de envío a la base de datos	40
5.1.5. Duración de la batería	41
5.2. Escenario GPRS	42
5.2.1. Comprobación del funcionamiento del sistema	42
5.2.2. Nivel de señal	44
5.2.3. Duración de las iteraciones	45
5.2.4. Tiempo de envío a la base de datos	46
5.2.5. Duración de la batería	48
<b>6. Conclusiones</b>	<b>49</b>
<b>7. Líneas futuras</b>	<b>52</b>
<b>8. Glosario</b>	<b>53</b>
<b>9. Anexos</b>	<b>56</b>
9.1. Anexo 1: Comparativa de protocolos de la capa de aplicación [22]	56
9.2. Anexo 2: Comparativa de protocolos de infraestructura [23]	56
9.3. Anexo 3: Comparativa de tecnologías de largo alcance [10]	57
9.4. Anexo 4: Comparativa de tecnologías de corto alcance [10]	57
9.5. Anexo 5: Parámetros básicos del protocolo ModBus [21]	58
9.6. Anexo 6: Características del sensor MEC10 [20]	58
9.7. Anexo 7: Características del sensor de temperatura y humedad [21]	59
<b>10. Bibliografía</b>	<b>60</b>

# Lista de Figuras

Figura 1. Planificación del TFM.	4
Figura 2. Diagrama de Gantt.	5
Figura 3. Perspectivas del IoT [6].	7
Figura 4. Arquitecturas del IoT [7].	9
Figura 5. Protocolos de comunicación IoT [9].	10
Figura 6. Elementos del IoT [9].	14
Figura 7. Tecnologías de comunicación según el alcance [10].	16
Figura 8. Ejemplos de elementos del IoT [9].	17
Figura 9. Transmisión y recepción en las distintas clases de dispositivos LoRa [12].	19
Figura 10. Ejemplos de arquitectura ZigBee [15].	22
Figura 11. Esquema de comunicación para el escenario LoRa.	24
Figura 12. Arquitectura típica de una red LoRa [16].	25
Figura 13. Diagrama de paso de datos en caso de dispositivo LoRa.	27
Figura 14. Esquema de comunicación para el escenario GPRS.	28
Figura 15. Activación de contexto PDP [13].	29
Figura 16. Diagrama de paso de datos en caso de dispositivo GPRS.	30
Figura 17. Sensor MEC10 utilizado.	32
Figura 18. Sensor de temperatura y humedad utilizado.	32
Figura 19. Datos recogidos por el sensor conectado al dispositivo.	34
Figura 20. Temperatura del suelo registrada por el sensor MEC10.	35
Figura 21. Contenido volumétrico del agua registrado por el sensor MEC10.	35
Figura 22. Permitividad registrada por el sensor MEC10.	35
Figura 23. Ciclo de carga de la batería en el escenario LoRa.	42
Figura 24. Datos recogidos por el sensor MEC10.	43
Figura 25. Datos recogidos por el sensor de temperatura y humedad.	43
Figura 26. Ciclo de carga de la batería en el escenario GPRS.	48



# 1. Introducció

En este primer capítulo de la memoria nos situaremos en el contexto y justificación del trabajo. Se fijarán los objetivos, su impacto ético social, la planificación de éste para llevarlo a cabo, un breve resumen de los productos obtenidos y se finalizará con una breve descripción del resto de capítulos.

## 1.1. Contexto y justificación del Trabajo

El presente trabajo tiene la finalidad de realizar una comparación entre dos sistemas que son de gran utilidad en entornos de agricultura donde, en la actualidad, la tecnología está muy presente para el procesamiento de datos. Es aquí donde entra el papel del Internet de las Cosas, conocido comúnmente por sus siglas IoT.

El IoT es un término que, en los últimos años, se ha asentado en el día a día de las personas, debido a la transformación digital que está experimentando la sociedad en su conjunto. Este concepto engloba una tecnología hecha para crear una red global donde las máquinas y dispositivos son capaces de interactuar entre sí. Este nuevo paradigma representa una de las evoluciones tecnológicas más importantes desde la creación de Internet como tal y supone una serie de oportunidades para todo el mundo, ya que proporciona a las personas la capacidad de interactuar con sensores, actuadores, servicios o, en definitiva, objetos conectados a Internet, consiguiendo mejorar las ciudades, término conocido como Smart City [1].

Debido a estos cambios, el sector de la agricultura se ha ido modernizando en este sentido, pasando así a ser un sector que está sufriendo la digitalización consiguiendo el concepto Smart Rural [2, 3]. Por ello, el uso de sistemas de comunicación con los que poder procesar datos de, por ejemplo, distintos cultivos que pueda tener una empresa, está aumentando.

En entornos como el que se va a tratar en el presente trabajo, las redes más utilizadas se conocen como redes de sensores inalámbricas, que permiten dar paso a distintas aplicaciones en el ámbito del IoT. Estas redes se conectan con distintas tecnologías de comunicación, entre las que podemos encontrarnos los sistemas de redes celulares tradicionales, sistemas de redes de bajo consumo y área amplia, conocidos como LPWAN, o sistemas basados en WiFi de larga distancia.

En concreto se va a realizar una comparación entre un sistema GPRS y un sistema LoRa, ya que son los sistemas de comunicación que actualmente se utilizan en el ámbito de estudio de este trabajo. Por una parte, LoRa, o *Long Range*, es una de las soluciones de capa física para las redes LPWAN y es una tecnología que opera en banda libre del

espectro de frecuencia. Por otra parte, GPRS, o *General Packet Radio Service*, es una tecnología de comunicación utilizada en redes celulares para transmitir información en paquetes y supuso una tecnología de transición entre el GSM y el UMTS.

## 1.2. Objetivos del Trabajo

A continuación, se presenta una lista sobre los objetivos del presente trabajo:

- **Introducir el concepto de IoT.** El cometido de esta introducción será presentar el IoT como uno de los términos tecnológicos más presentes en la actualidad. Para ello, se parte de una definición del concepto y de la arquitectura que presenta, para pasar a presentar los protocolos de comunicación y de algunas de las distintas tecnologías de comunicación que forman parte del paradigma. Dentro de estas tecnologías se encuentran LoRa y GPRS, que centrarán el apartado práctico del presente trabajo.
- Realizar una **comparación** de las dos tecnologías de comunicación ya mencionadas.
- **Proporcionar una visión de los distintos sistemas de comunicación** en los que se desarrollarán las pruebas a realizar. En este punto, se propondrán los dos escenarios (uno para cada tecnología a analizar), ya que difieren en cuanto a cómo se transmiten los datos captados por los dispositivos.
- **Proporcionar los resultados de las pruebas realizadas.** Las pruebas se basan en la comparación en términos de consumo de las distintas tecnologías y el tiempo de envío de los mensajes al servidor. Con esto se persigue presentar las diferencias en cuanto a eficiencia energética de las tecnologías y en cuanto a latencia de mensajes generados por los dispositivos.

## 1.3. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad

En relación con la competencia ético y global, el presente trabajo tiene una alineación con algunas de las ODS propuestas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030 de la ONU, como se muestra en [4].

En el campo de la sostenibilidad, este trabajo se alinea con la ODS 9, que trata sobre una industrialización inclusiva y sostenible, donde la innovación de nuevas tecnologías juega un papel fundamental. Los sistemas propuestos intentan innovar en el campo de la agricultura, incluyendo sistemas de monitorización de cultivos, que captarán datos y serán procesados para mostrar el estado de estos. Otra ODS con la que está alineado es la 13, que trata sobre la acción climática. Esto se debe a que los dispositivos utilizados en el

sistema para monitorizar el estado de la superficie a monitorizar poseen un modo de bajo consumo, haciendo posible tener un uso moderado de las baterías y que estas no se degraden tan rápido en el tiempo. Por tanto, considerando que con esto se reduce el uso de baterías y se contribuye a la acción climática.

## 1.4. Enfoque y método seguido

Este trabajo tiene como finalidad analizar las tecnologías y protocolos IoT existentes, así como la comparación entre dos sistemas que utilizan estas tecnologías. En este caso, se va a proceder al análisis de dos de estas tecnologías en un entorno de automatización y monitorización de superficies de agricultura.

La metodología para una parte del trabajo consistirá en la revisión bibliográfica del concepto de IoT. Con esto se pretende hacer una búsqueda sobre una parte del tema clave del trabajo, con el fin de desarrollar una base teórica suficiente para entender el desarrollo de este.

Tras esto, se pasará a estudiar el caso concreto de las tecnologías y sistemas implicados en el ejemplo práctico que posteriormente se analizará. Para ello, se analizará las partes de los sistemas de comunicación, tanto en el caso de la utilización de LoRa como tecnología de comunicación, como en el caso de GPRS.

Por último, se procederá a realizar una comparativa a efectos prácticos en el que se muestren los resultados obtenidos de la parte práctica del trabajo y las conclusiones sobre los sistemas analizados.

## 1.5. Planificación del trabajo

Para el desarrollo del presente trabajo se va a utilizar información obtenida de libros y documentos relacionados con el área de las telecomunicaciones y el uso de dispositivos IoT que implementan tecnología LoRa y GPRS como tecnologías base para el sistema de comunicación que se va a comentar en las pruebas.

Por tanto, el desarrollo del trabajo va a estar dividido en cinco partes, que incluyen las cinco fases de la creación completa del TFM. Esto es:

- Definición del tema escogido, alcance, objetivos y planificación temporal.
- Exposición del concepto de IoT y de las tecnologías seleccionadas para la realización de las pruebas mencionadas.
- Realización de las pruebas.
- Redacción de la memoria del TFM.

- Preparación de una presentación y defensa del TFM.

A continuación, se muestra la planificación que se va a seguir de aquí a la finalización del trabajo:

## Desarrollo del TFM

Nombre	Fecha de inicio	Fecha de fin
Elección del tema y desarrollo de las distintas tareas	1/3/23	9/3/23
Definición del contexto del trabajo	1/3/23	1/3/23
Definición del tema	2/3/23	3/3/23
Impacto en sostenibilidad, etico-social y de diversidad	6/3/23	7/3/23
Enfoque y método seguido	8/3/23	8/3/23
Planificación del trabajo	9/3/23	9/3/23
Estado del arte del TFM	13/3/23	24/3/23
Búsqueda de información	13/3/23	15/3/23
Redacción del estado del arte	16/3/23	24/3/23
Exposición de los sistemas y pruebas realizadas	27/3/23	19/5/23
Investigación de la tecnología GPRS	27/3/23	4/4/23
Definición de las partes del sistema GPRS	5/4/23	7/4/23
Investigación de la tecnología LoRa	10/4/23	18/4/23
Definición de las partes del sistema LoRa	19/4/23	21/4/23
Introducción de los dispositivos utilizados para las pruebas	24/4/23	28/4/23
Realización de pruebas con los dispositivos	1/5/23	19/5/23
Entrega de la memoria del TFM	22/5/23	9/6/23
Redacción de los resultados obtenidos	22/5/23	26/5/23
Redacción de las conclusiones	29/5/23	2/6/23
Finalización de la memoria	5/6/23	9/6/23
Defensa del trabajo	13/6/23	22/6/23

Figura 1. Planificación del TFM.

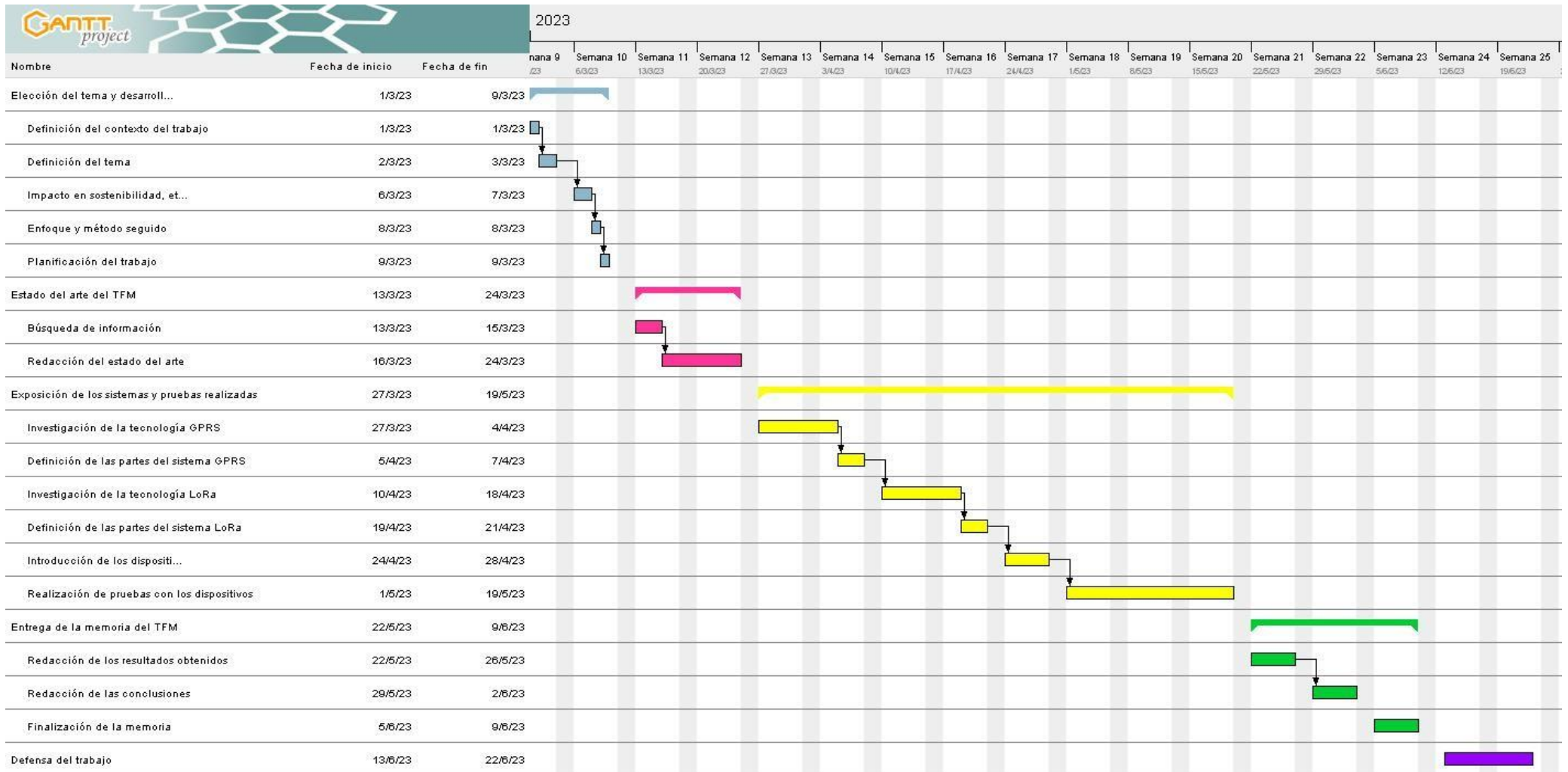


Figura 2. Diagrama de Gantt.

## 1.6. Breve resumen de productos obtenidos

El producto obtenido con este trabajo consta en la comparación de dos sistemas de comunicación, utilizando tecnologías de comunicación distintas, como son LoRa y GPRS. Para la comparación se mostrarán gráficas y tablas con los resultados obtenidos tras haber realizado las pruebas descritas a lo largo de la memoria. Tras la presentación de los resultados, se sacarán las conclusiones correspondientes de los sistemas descritos.

## 1.7. Breve descripción de otros capítulos de la memoria

El capítulo 2 de la memoria está enfocado a presentar un Estado del Arte del paradigma del IoT. En él, se partirá de una introducción al concepto del Internet de las Cosas, especificando las perspectivas que incurren en la aparición de este paradigma, se pasará a mostrar las posibles arquitecturas que se han desarrollado para esta tecnología, las capas que las componen y los protocolos más utilizados, y se terminará listando los elementos claves para la correcta funcionalidad del IoT.

En el capítulo 3, se pasará a presentar algunas de las tecnologías que se pueden implementar en un sistema IoT, comentando las características técnicas de cada una e indicando ventajas y desventajas que pueden suponer frente a otras posibilidades existentes. Además, se detallarán las partes de los escenarios donde se realizarán las pruebas posteriores, tanto en el caso de utilizar la tecnología LoRa como para GPRS.

El capítulo 4 sirve para presentar los sistemas que están en estudio en este trabajo, así como las herramientas que lo conforman y con las que se harán las pruebas posteriormente. Además, se explicará en forma de diagrama el proceso de envío de datos desde su toma en los sensores hasta que son introducidos en la base de datos.

En el capítulo 5 se procede a mostrar los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas para cada escenario de comunicación. Se acompañará de gráficos y tablas que recojan los datos obtenidos y de las correspondientes conclusiones de cada prueba.

Por último, el capítulo 6 recogerá las conclusiones de los resultados obtenidos y el capítulo 7 contendrá las posibles líneas futuras de este trabajo.

## 2. Estado del arte

En este segundo capítulo, se presenta el estado del arte del trabajo, que engloba un recorrido de lo que es el Internet de las Cosas. Se comienza con una introducción al concepto del IoT. Tras esto, se pasará a explicar los modelos de arquitecturas disponibles, los protocolos presentes en las capas de esas arquitecturas y, para terminar, una lista de los elementos fundamentales del IoT.

### 2.1. Introducción al IoT

Actualmente, el concepto de Internet de las Cosas se refiere a una tecnología que permite a personas y cosas estar conectadas en cualquier momento, en cualquier lugar, con cualquier cosa y con cualquiera, idealmente usando cualquier ruta o red y cualquier servicio [5]. Sin embargo, desde que surgió esta nueva tecnología, muchos autores han definido al IoT de diversas formas, todas enfocadas en el mismo fin.

Ejemplo de esto, como se discute en [6], los organismos de estandarización abordan esta nueva tecnología desde el punto de vista de “Orientada a Internet” o mediante la perspectiva de “Orientada a las Cosas”, dependiendo de los intereses específicos de cada uno de estos. Además, la propia definición de IoT implica un gran número de objetos, por lo que el direccionamiento único del objeto y la representación y el almacenamiento de la información se convierten en dos de los problemas que hacen que aparezca otra visión, “Orientada a la semántica”.

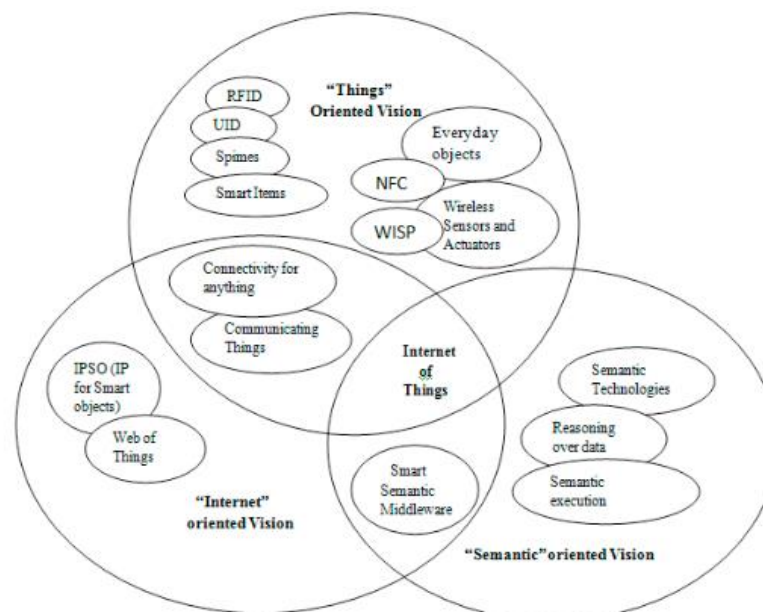


Figura 3. Perspectivas del IoT [6]



Como se puede observar en la figura anterior, el término de IoT supone la convergencia de todas las perspectivas existentes, cada una de ellas con las distintas tecnologías implicadas.

Por una parte, en la visión de “Orientada a Cosas”, los objetos son rastreados por sensores y tecnologías que utilizan Identificación por Radiofrecuencia (del inglés *Radio Frequency Identification*) o RFID. Cada objeto se identifica mediante un identificador EPC único y los datos se recolectan mediante sensores o sistemas embebidos de sensores. Esta visión depende de redes de sensores basados en la tecnología RFID [6].

Por otra parte, la perspectiva “Orientada a Internet” nace de la necesidad de que los objetos o dispositivos físicos se encuentran de alguna manera conectados, esto es, sensores que pueden identificarse mediante una dirección IP e intercambian información entre ellos. Por esto, esta visión del IoT se centra en aumentar la inteligencia de los objetos que se encuentran conectados a Internet. Dichos objetos necesitan conocer, por lo tanto, los protocolos relacionados con Internet, como el direccionamiento IPv4 o el futuro IPv6, y la información enviada por estos debe unificarse mediante un formato único, para poder analizar parámetros y atributos y extraer la información útil.

Por último, en la visión “Orientada a la Semántica” se hace especial énfasis en la idea de que la cantidad de información intercambiada por los distintos objetos es demasiado grande. Por lo tanto, en este punto de vista se proponen métodos para procesar dichos datos de forma coherente, eliminando la parte de dicha información que resulte redundante y haciendo que, tras aplicar métodos de procesamiento de datos, la información que se almacene se convierta en significativa.

Con todas estas perspectivas, el IoT se centra en la integración de objetos o dispositivos inteligentes en una misma arquitectura, donde las “cosas” y la perspectiva orientada a Internet dotan a este paradigma de un significado orientado a la red mediante el protocolo IP. Además, la inmensa cantidad de dispositivos conectados mediante esta tecnología contribuyen a diversos retos que se solventan utilizando tecnologías conocidas como semánticas, haciendo que el IoT sea una realidad.

## 2.2. Arquitectura básica

El modelo de arquitectura para esta nueva tecnología conocida como IoT ha dado lugar a diferentes interpretaciones de este. Esto ha dado lugar a distintos modelos de esta. Tal y como se discute en [7], se pueden llegar a proponer unos cuatro modelos distintos de arquitectura para un sistema IoT: modelo de tres capas, modelo de capa intermedia o Middleware, modelo orientado a servicios o SOA y modelo de cinco capas.



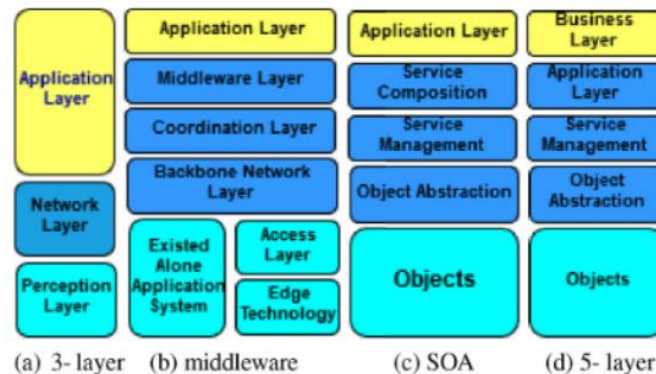


Figura 4. Arquitecturas del IoT [7].

Empezando por el más básico, el modelo de tres capas está compuesto por la capa de percepción, la capa de red y la capa de aplicación. Como se puede observar, en el resto de los modelos se aumenta el nivel de abstracción de la arquitectura, ya que la capa intermedia experimenta una división en tres capas distintas. Además, en el segundo modelo también se realiza una subdivisión en tres de la capa de percepción o capa de objetos.

Si bien no hay una arquitectura definida por completo para el IoT, todas estas perspectivas se enfrentan al reto de la abstracción de los objetos y las capacidades de comunicación existentes, proporcionando un conjunto de servicios comunes y la creación de dichos servicios.

Las arquitecturas más utilizadas son la arquitectura de tres capas y la de cinco capas, siendo la primera introducida en las primeras fases de investigación sobre el paradigma del IoT. En [8] definen cada capa de la arquitectura de 3 capas como:

- **Capa de percepción:** es comparable a la capa física del modelo OSI tradicional. En esta capa, se incluye la identificación de los objetos y la recopilación de la información que va a ser procesada. Por tanto, esta capa incluye las etiquetas y lectores, etiquetas RFID, sensores, actuadores y otros objetos que recojan información del medio y que se comuniquen con otros objetos del entorno.
- **Capa de red:** es la responsable de la conexión con otros dispositivos inteligentes, los cuales se encuentran conectados a la red de Internet o a servidores del sistema. Su función principal es transmitir y procesar la información obtenida por los objetos en la capa de percepción.
- **Capa de aplicación:** es la capa encargada de brindar de servicios inteligentes a los usuarios, ya sean personas, un sistema físico o un proceso que necesita de estos servicios.

Sin embargo, esta arquitectura, aunque define la principal idea del IoT, no es suficiente para la investigación de este paradigma, porque no se centra en aspectos como la abstracción de los objetos. Es por esto por lo que han ido apareciendo otras arquitecturas, como la arquitectura de cinco capas, en la que, según [8], se definen 2 capas distintas que en el caso de la arquitectura de 3 capas:

- **Capa de procesamiento:** se encarga de almacenar, analizar y procesar la información que se obtiene mediante los objetos y que es recibida por la capa de transporte o de red. La necesidad de abstracción de esta capa radica en la gran cantidad de objetos que pueden estar conectados en el sistema y por la cuantiosa información que estos generan.
- **Capa de negocios:** tiene el rol de administrar el sistema, desde la gestión de los lanzamientos y la carga de varias aplicaciones hasta la investigación del modelo de negocio y el de ganancias. Además, también se encarga de gestionar la privacidad de los usuarios.

## 2.3. Protocolos de comunicación del IoT

La estandarización para el desarrollo de protocolos para el IoT ha sido llevada a cabo por organismos como IEEE, ZigBee Alliance, Bluetooth SIG, IETF, ETSI o ITU. Además, muchos de estos organismos se unieron en una plataforma conjunta conocida como oneM2M para el desarrollo de un estándar que se encargue de abordar las necesidades de las aplicaciones y los servicios del IoT.

Application Protocol		DDS	CoAP	AMQP	MQTT	MQTT-SN	XMPP	HTTP REST
Service Discovery		mDNS			DNS-SD			
Infrastructure Protocols	Routing Protocol	RPL						
	Network Layer	6LoWPAN			IPv4/IPv6			
	Link Layer	IEEE 802.15.4						
	Physical/Device Layer	LTE-A	EPCglobal	IEEE 802.15.4	Z-Wave			
Influential Protocols		IEEE 1888.3, IPSec				IEEE 1905.1		

Figura 5. Protocolos de comunicación IoT [9].

En la figura anterior, recogida en [9], se muestran los protocolos más destacados definidos por los grupos anteriormente mencionados. Se definen los protocolos divididos en cuatro categorías: de aplicación, de descubrimiento de servicios, de infraestructura y otros protocolos influyentes.

A continuación, se van a profundizar en aquellos protocolos más comunes de cada categoría, proporcionando sus funcionalidades principales. En los anexos se proporcionan tablas comparativas de algunos de estos protocolos.

### 2.3.1. Protocolos de aplicación

- 1) **CoAP**: se define como un protocolo de transferencia web basado en la transferencia de estado representacional (REST) además de funcionalidades HTTP. REST representa una forma sencilla de transferencia de datos entre clientes y servidores a través de HTTP. Este protocolo está vinculado a UDP, por lo que es más adecuado para las aplicaciones IoT. Además, modifica funcionalidades de HTTP para cumplir con los requisitos de IoT, como el bajo consumo de energía y el funcionamiento en entornos de ruido y con pérdidas. CoAP tiene como objetivo habilitar dispositivos de poco tamaño con capacidades de comunicación, computación y bajo consumo utilicen interacciones RESTful. Es un protocolo con un modelo de tipo petición/respuesta y sus características más importantes son su simplicidad, la admisión de conexiones punto a punto y punto a multipunto y tener la capacidad de intercambio de mensajes de forma síncrona. Sin embargo, tiene mala latencia, mala entrega de paquetes y no se puede utilizar en entornos con datos complejos.
- 2) **MQTT**: es un protocolo que busca conectar dispositivos y redes integrados con las aplicaciones y el middleware mediante un mecanismo de enrutamiento, que lo habilita como un protocolo de conexión óptimo para IoT y M2M. Utiliza un modelo de publicación/suscripción que proporciona flexibilidad y simplicidad de implementación, siendo adecuado para dispositivos con recursos limitados que usan enlaces poco fiables o de bajo ancho de banda. Se basa en el protocolo TCP y es un protocolo que consiste en tres componentes: *subscriber*, *publisher* y *broker*. El *subscriber* es el dispositivo que se suscribe a un tópico específico del que quiere ser informado. El *publisher* actúa como generador de información, que se hará llegar a los *subscriber*. El *broker* es el encargado de ofrecer seguridad mediante mecanismos de autorización entre *publishers* y *subscribers*.
- 3) **XMPP**: se trata de un estándar de mensajería instantánea que se usa por parte de aplicaciones de chat múltiple, llamadas de voz y telepresencia. Este protocolo permite la comunicación mediante Internet, permitiendo autenticación, control de acceso, medición de privacidad, compatibilidad con otros protocolos y cifrado salto a salto y de extremo a extremo. Además, es el único protocolo de capa de aplicación que soporta los dos modelos existentes, publicación/suscripción y petición/respuesta, siendo el desarrollador el que elija el tipo de modelo, dependiendo de la aplicación que se quiera llevar a cabo. Sin embargo, no proporciona calidad de servicio y no es práctica para comunicaciones M2M.

- 4) **AMQP**: es un protocolo que, al igual que MQTT, utiliza un modelo de publicación/suscripción, el cual se utiliza principalmente en plataformas comerciales y de negocios. Utiliza TCP como capa de transporte y el protocolo SSL como parte de seguridad. Es utilizado en entornos de intercambio de mensajes entre distintos objetos y su característica más importante es la heterogeneidad y la interoperabilidad que ofrece para distintos dispositivos. Además, es un protocolo muy parecido a MQTT, con la diferencia de que AMQP tiene la ventaja de que almacena los datos y los reenvía, asegurando la entrega correcta de la información cuando se producen interrupciones en la red y aumentando la fiabilidad de esta.
- 5) **DDS**: es un protocolo que soporta muchos criterios de QoS y este se escoge dependiendo del modelo de comunicación escogido para la publicación/suscripción. Además, define dos subcapas: la capa de suscripción y la capa de reconstrucción local de datos. La primera de ella se encarga de entregar al suscriptor el mensaje de información sobre el tema al que se han suscrito y la segunda capa, la cual es opcional, permite la integración del protocolo en la capa de aplicación.

### 2.3.2. Protocolos de descubrimiento de servicios

La gran escalabilidad de un sistema IoT requiere de un mecanismo de gestión de recursos que sea capaz de registrar y descubrir nuevos recursos y servicios de manera auto configurada, eficiente y dinámica [9].

- 1) **mDNS**: es un servicio que puede realizar la función de un servidor DNS de multidifusión. Es un protocolo utilizado en casos de dispositivos embebidos basados en Internet, debido a que no se necesita configuración manual, se puede ejecutar sin infraestructura que lo respalde y puede seguir funcionando en caso de que lo haga la infraestructura. El mecanismo de descubrimiento es el de consultar nombres mediante el envío de un mensaje de multidifusión IP a todos los nodos conectados al mismo dominio. Tras esto, los nodos destino responden con otro mensaje de multidifusión con su dirección IP y el resto de los dispositivos actualizan su caché con esa información.
- 2) **DNS-SD**: es un protocolo utilizado para descubrir una lista de servicios en una red específica utilizando mensajes DNS. Es similar al protocolo anterior en cuanto a que no necesita configuración para conectar máquinas y hace uso de mDNS para enviar mensajes DNS a nodos específicos mediante UDP. El funcionamiento para el descubrimiento de servicios se realiza en dos pasos: encontrar los nombres de los *hosts* de servicios solicitados (esto es importante porque las direcciones IP pueden cambiar) y emparejar las direcciones IP con sus nombres utilizando mDNS.

### 2.3.3. Protocolos de infraestructura

- 1) **RPL**: es un protocolo de enrutamiento por vector de distancia que utiliza IPv6 y que proporciona un mecanismo para admitir tráfico multipunto a punto, punto a multipunto y punto a punto. Fue diseñado principalmente para redes inalámbricas, en las que los dispositivos que la forman poseen poca batería, ofreciendo una solución de enrutamiento versátil para proporcionar buen rendimiento en entornos LLN y que se adapta a una amplia cantidad de protocolos de enlace.
- 2) **6LoPWAN**: protocolo que tiene como función la de facilitar la transmisión de paquetes IPv6 en pequeñas tramas de capa de enlace de los protocolos de capa física y de enlace. Es adecuado para el IoT porque es capaz de conectar una gran cantidad de dispositivos y controlar a estos mediante la red IP. Además, brinda a los objetos de la función que les posibilita el descubrimiento de otros objetos en redes ad-hoc y en redes subenrutadas que utilicen direcciones de capa de enlace en vez de utilizar direcciones IP.
- 3) **LTE/LTE-A y 5G**: se trata de protocolos de para comunicaciones móviles que son utilizados en las capas más bajas de la estructura. Por una parte, LTE y LTE-A proporcionan un mayor ancho de banda de comunicación y mayor soporte de movilidad. Además, al ser un estándar enormemente extendido por todo el mundo, se convierte en uno de los candidatos más adecuados para la comunicación M2M en el IoT. Sin embargo, es un tipo de comunicación pensada para transmisión de persona a persona o H2H, lo que hace que implementar un sistema IoT utilizando el LTE o LTE-A sea costoso en cuanto a manejo de datos y a energía consumida. Por otra parte, las redes 5G se encargan de solventar de alguna forma los problemas de las redes LTE y LTE-A, como son el soporte de una gran cantidad de dispositivos M2M, una velocidad de obtención de datos casi instantánea y una baja latencia.
- 4) **BLE**: es un protocolo conocido comúnmente como Bluetooth en su versión de baja energía, siendo clave para comunicaciones inalámbricas de corto alcance. Dentro de los protocolos de comunicación de la capa física, este estándar es más eficiente en términos de consumo de energía y en cuanto a radio de transmisión de energía por bit transmitido. La topología que puede tomar el sistema utilizando este protocolo es de estrella, pudiendo los dispositivos que están en este ser esclavos o maestros.
- 5) **IEEE 802.15.4**: fue creado como una capa específica que recoge tanto capa física como capa de enlace para conexiones LR-WPAN. Se utiliza en sistemas de IoT y en WSN, ya que proporciona comunicación fiable, operabilidad y puede soportar hasta, aproximadamente, 65000 nodos. Además, suministra un gran nivel de seguridad, encriptación y servicios de autenticación, pero no facilita la garantía de QoS.

### 2.3.4. Protocolos influyentes

- 1) **Seguridad:** los protocolos referentes a la seguridad dentro de la arquitectura IoT debe tener consideración en todas las capas. En la capa de enlace, el protocolo IEEE 802.15.4 proporciona mecanismos de seguridad para proteger la comunicación entre dos nodos del sistema. En la capa de red, el protocolo IPSec es el más eficiente y puede servir a cualquier capa superior. Por otro lado, el protocolo TLS es muy conocido para proporcionar seguridad en la capa de transporte para comunicaciones TCP, mientras que el protocolo DTLS lo proporciona a comunicaciones UDP. Por último, en la capa de aplicación, cada protocolo presenta su método de seguridad propio.
- 2) **Interoperabilidad:** en este caso, el estándar IEEE 1905.1 es el protocolo que proporciona una capa de abstracción que oculta la diversidad de topologías MAC, sin requerir cambios en las capas subyacentes. Además, proporciona una interfaz para tecnologías de redes domésticas comunes, pudiendo coexistir estas tecnologías entre sí.

## 2.4. Elementos del IoT

Una vez presentadas las posibles arquitecturas que se pueden dar en un sistema IoT, las capas que las componen y los protocolos más utilizados en dichas capas, la funcionalidad del IoT se puede comprender mejor definiendo todos los elementos necesarios para ofrecer esa funcionalidad. Estos elementos, según como se recoge en [9], son: identificación, detección, comunicación, computación, servicios y semántica.

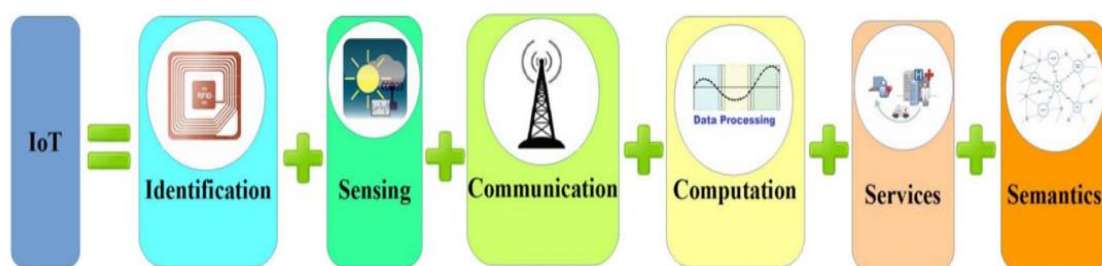


Figura 6. Elementos del IoT [9].

### 2.4.1. Identificación

Se trata del elemento más importante dentro del paradigma del IoT, encargado de poner nombre y enlazar a los servicios que puede ofrecer el sistema con su demanda. Como ya se ha comentado, hay algunos métodos para identificar a los objetos dentro del sistema, como, por ejemplo, el EPC o los uCode.



La identificación supone un punto crítico dentro de un sistema IoT, ya que es la parte que se encarga de poner el identificador a un objeto, diferenciándolo así de su dirección dentro del sistema, como las direcciones IPv6 o IPv4. Además, la distinción entre identificador y dirección es clave en un sistema IoT, ya que los métodos de identificación no son únicos, mientras que las direcciones ayudan a identificar a los objetos de forma única.

### 2.4.2. Detección

La detección como elemento del IoT significa recopilar la información en forma de datos que recogen los objetos del sistema en cuestión y enviarlos a una base de datos o similar. Estos datos serán analizados posteriormente, con el fin de ofrecer un servicio acorde a lo acordado con el cliente. Los dispositivos encargados de la detección son los sensores IoT, que pueden ser desde sensores inteligentes hasta actuadores o dispositivos de detección portátiles.

Los sensores más utilizados para sistemas IoT se conocen como computadoras de placa única integradas con sensores, que poseen funcionalidades de seguridad incorporadas. Ejemplo de estos sensores son Arduino, Raspberry PI, BeagleBone Black, etc.

### 2.4.3. Comunicación

La comunicación en el IoT se realiza a través de las tecnologías existentes para conectar a los objetos y poder ofrecer servicios inteligentes. Ejemplo de estas tecnologías son WiFi, Bluetooth, ZigBee, Z-Wave o LTE-A, RFID, NFC o tecnologías UWB.

Dado el alto número de dispositivos que se encuentran conectados hoy día, y ya que serán más en el futuro, la necesidad del desarrollo de tecnologías que soporten dicha conectividad es una de las cosas en las que se centran los principales organismos mundiales. Como se discute en [10], las diferentes tecnologías de conectividad que existen en la actualidad se pueden clasificar en términos de alcance como tecnologías de corto alcance o de largo alcance. En el primer grupo encontramos a Bluetooth, WiFi, ZigBee o tecnologías OWC, mientras que en el segundo grupo están el LTE, el 5G o las tecnologías LPWAN.

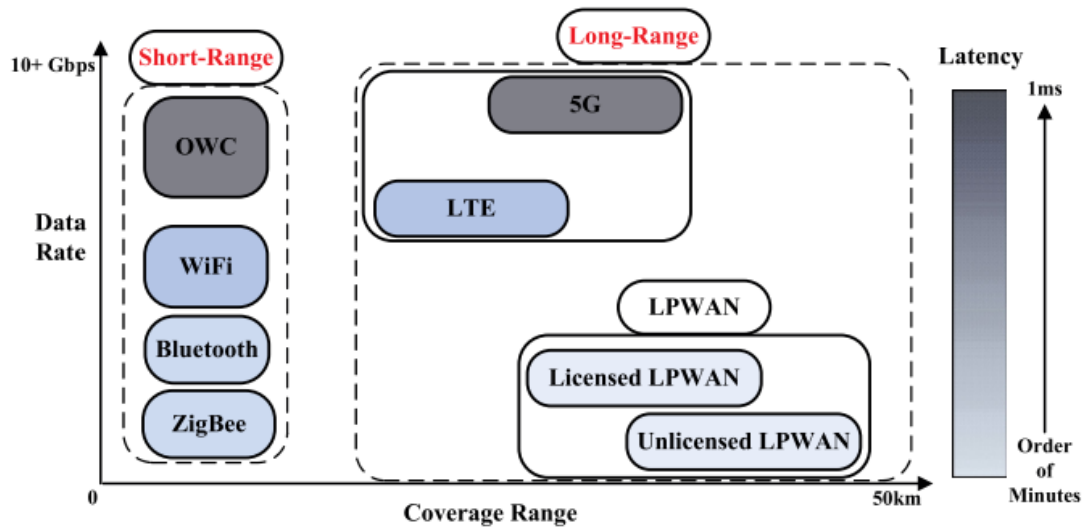


Figura 7. Tecnologías de comunicación según el alcance [10].

#### 2.4.4. Computación

Este elemento está representado por las unidades de procesamiento, como microcontroladores, SOC o FPGA, y las aplicaciones de software que se implantan en el sistema. Es decir, la computación está formada por parte *hardware* y parte *software*.

Por una parte, en cuanto a *hardware*, hay muchas plataformas que han desarrollado productos para aplicaciones IoT, como Arduino, Raspberry PI o Intel Galileo, entre otros. Por otra parte, en *software* hay muchas plataformas que proveen de funcionalidades de IoT, siendo las más populares los sistemas operativos que se ejecutan en los dispositivos del sistema durante el tiempo de ejecución o la tarea a realizar por parte del objeto. Para el desarrollo del IoT, los sistemas operativos RTOS son uno de los mejores exponentes.

Además del *hardware* y el *software*, las plataformas en la nube también forman parte de la computación del IoT. Estas plataformas poseen instalaciones donde los datos captados por los objetos del sistema IoT se procesan en tiempo real, permitiendo que los usuarios finales obtengan dichos datos procesados al instante.

#### 2.4.5. Servicios

Los servicios dentro del IoT se categorizan en [9] dentro de cuatro clases: relacionados con la identidad, de agregación de información, de colaboración consciente y ubicuos.

Por una parte, los servicios relacionados con la identidad son los servicios más básicos e importantes dentro del paradigma del IoT, ya que significan la identificación de los objetos que ofrecen el servicio específico. Por otra parte, los servicios de agregación de



información se encargan de recopilar y almacenar los datos sin procesar que ofrecen los objetos IoT, que tendrán que ser procesados por la aplicación en sí. Por su parte, los servicios de colaboración consciente actúan sobre los servicios de la clase anterior para tomar decisiones en función de los datos captados por los objetos. Por último, los servicios ubicuos proporcionan servicios de colaboración al usuario final en cualquier momento y en cualquier lugar.

### 2.4.6. Semántica

Este elemento hace referencia a la habilidad de extraer, de manera inteligente, conocimiento por diferentes máquinas, proporcionando así los servicios requeridos. Esta extracción incluye el descubrimiento, el uso de recursos y el modelado de la información final, así como el reconocimiento y análisis de los datos para proporcionar un servicio exacto al usuario final.

Las tecnologías que dan apoyo a la semántica son, por ejemplo, el RFD, el lenguaje OWL o el formato EXI. Esta última es importante en el contexto del IoT, ya que posee un diseño que optimiza las aplicaciones en entornos con recursos limitados que utilizan XML. Con esto, se reduce la necesidad de ancho de banda, convirtiendo los mensajes XML a mensajes binarios, lo cual ayuda a reducir su tamaño.

IoT Elements		Samples
<b>Identification</b>	<b>Naming</b>	EPC, uCode
	<b>Addressing</b>	IPv4, IPv6
<b>Sensing</b>		Smart Sensors, Wearable sensing devices, Embedded sensors, Actuators, RFID tag
<b>Communication</b>		RFID, NFC, UWB, Bluetooth, BLE, IEEE 802.15.4, Z-Wave, WiFi, WiFiDirect, LTE-A
<b>Computation</b>	<b>Hardware</b>	SmartThings, Arduino, Phidgets, Intel Galileo, Raspberry Pi, Gadgeteer, BeagleBone, Cubieboard, Smart Phones
	<b>Software</b>	OS (Contiki, TinyOS, LiteOS, Riot OS, Android); Cloud (Nimbits, Hadoop, etc.)
<b>Service</b>		Identity-related (shipping), Information Aggregation (smart grid), Collaborative-Aware (smart home), Ubiquitous (smart city)
<b>Semantic</b>		RDF, OWL, EXI

Figura 8. Ejemplos de elementos del IoT [9].

### 3. Tecnologías de conectividad en el IoT

Debido a la gran cantidad de dispositivos que se encuentran conectados hoy día, y que dicho número aumentará en el futuro, la necesidad del desarrollo de tecnologías que soporten esta conectividad es una de las cosas en las que se centran los principales organismos mundiales. Como se discute en [10], las diferentes tecnologías de conectividad que existen en la actualidad se pueden clasificar en términos de alcance como tecnologías de corto alcance o de largo alcance. En el primer grupo encontramos a Bluetooth, WiFi, ZigBee o tecnologías OWC, mientras que en el segundo grupo están las redes móviles celulares (GPRS, 3GPP, 4G o 5G) o las tecnologías LPWAN. En los anexos se proporcionan comparativas entre algunas de estas tecnologías.

#### 3.1. Tecnologías de largo alcance

Entre estas tecnologías existen las típicas tecnologías enfocadas a las comunicaciones móviles (como GPRS), las enfocadas a resolver los problemas de entornos LPWAN (LoRa o SigFox), el NB-IoT y el LTE-M, que se trata de una versión más básica del LTE.

##### 3.1.1. LoRa: Long Range

LoRa, o Long Range, es una de las soluciones de capa física para las redes LPWAN. Esta tecnología utiliza una modulación de espectro ensanchado basada en CSS, es decir, una modulación FM-chirp, cuya frecuencia cambia en forma de rampa y en la que, sobre un ancho de banda amplio, se ensancha una banda estrecha. El ancho de banda ocupado en esta tecnología oscila entre 125 y 250 KHz y la modulación empleada hace que esta tecnología brinde al sistema implementado de resistencia a interferencia y una reducción de SINR, haciendo que se pueda cubrir un área de más de 10 km. El factor de ensanchado escogido afecta a las velocidades de transmisión, oscilando éstas entre 292 bps y 50 kbps. Además, LoRa se trata de una tecnología que opera en frecuencias libres, pudiendo utilizarse en Europa de 16 canales de 125 KHz cada uno en la banda de 868 MHz [11].

Por otra parte, en 2015, LoRa Alliance creó lo que se conoce hoy día como el estándar LoRaWAN, el cual es un estándar para la capa de enlace que define una topología de red de redes de estrellas y en la que pueden existir tres clases de dispositivos, según [10], todo estos teniendo que ser compatibles con los de Clase A:

- **Clase A**, que son aquellos dispositivos que tienen un consumo muy bajo de potencia. Estos dispositivos se utilizan para transmitir ALOHA puro en el UL y reciben cortas comunicaciones en el DL.

- **Clase B**, que son aquellos dispositivos utilizados en aplicaciones de alta demanda de comunicación en el DL.
- **Clase C**, en la que se encuentran los dispositivos que requieren de comunicación continua.

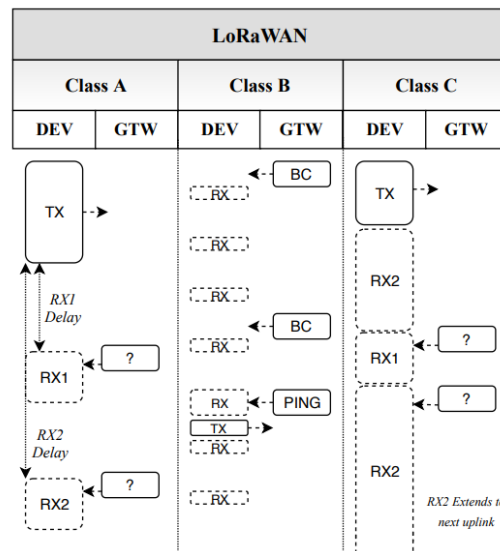


Figura 9. Transmisión y recepción en las distintas clases de dispositivos LoRa [12].

### 3.1.2. GPRS

Se trata de una mejora del estándar GSM para transportar datos de manera eficiente y que permite que los dispositivos inalámbricos accedan a Internet [9].

Para permitir que se envíen datos a través de las redes GSM, GPRS se diseñó como un añadido a la conmutación de paquetes a la conmutación de circuitos existente. A diferencia de GSM, GPRS es una red de conmutación de paquetes extremo a extremo, donde los paquetes IP se envían usando dicha conmutación.

En cuanto a velocidades, se pasan de tener unas velocidades de 9.6 kbit/s o 14.4 kbit/s que se tenía en GSM a velocidades teóricas de 170 kbit/s. También se consigue una reducción en el tiempo de establecimiento de llamadas, pasando de 20 segundos a 5 segundos en GPRS.

### 3.1.3. LTE-M

Es una de las tecnologías que hace uso de una banda con licencia. Es compatible con las redes celulares actuales en la que los dispositivos se conectan directamente a la red 4G

sin necesidad de pasarelas. Además, es una versión simplificada del LTE, orientada a dispositivos de bajo coste y aplicaciones de IoT con bajo consumo de energía. Su área de cobertura no es muy extensa, alcanzando unos cuantos kilómetros.

Utiliza OFDMA en el DL y SC-FDMA multitono en el UL, con una separación entre portadoras de 15 kHz. La modulación usada es la 16-QAM con una canalización de 1.4 MHz, consiguiendo unas tasas de hasta 1 Mbps, utilizando los dispositivos a una potencia de 20-23 dBm.

### 3.1.4. SigFox

Se trata de otra de las tecnologías que opera en la banda sin licencia y, a diferencia de LoRa, utiliza una banda ultra ancha, de unos 100 Hz, para realizar transmisiones muy cortas de carga. Esto hace que el consumo de energía se reduzca, con una cobertura entre 10 y 50 km, aunque se pierde velocidad de transmisión. Además, para poder llevarlo a cabo, los receptores poseen una sensibilidad muy baja [10].

Para la comunicación se utiliza un esquema asimétrico, en el sentido de que para poder llevar a cabo una comunicación DL, hace falta tener activa una UL. Esta asimetría se nota en la carga que pueden llevar dichas conexiones, puesto que en el UL se restringe el número de mensajes por día a 140, y con una longitud no mayor a 12 bytes, y en el DL hasta 4 mensajes con una longitud máxima de 8 bytes. Estas limitaciones hacen que LoRa sea una mejor alternativa para aplicaciones IoT.

En cuanto a especificaciones técnicas, se hace uso de modulaciones DBPSK y GFSK con tasas binarias que oscilan entre 100 y 600 bps. Los mensajes enviados se mandan 3 veces utilizando la técnica de salto en frecuencia, es decir, cada mensaje se manda a una frecuencia distinta. Por último, se utiliza un ancho de banda de 200 kHz, siendo la banda escogida en Europa la que va desde 868 a 869 MHz.

### 3.1.5. NB-IoT

Es otra de las tecnologías que operan en bandas con licencia, siendo similar al LTE-M con la diferencia que este se encuentra ya implementado en el sistema LTE existente desde el Release 13. Se utiliza una banda estrecha de 200 kHz, reduciendo así la complejidad del sistema, el coste de los dispositivos, haciendo que se prolongue más la duración de su batería, y proporcionando mayor penetración a la comunicación. Además, las tasas de datos de esta tecnología son de 158.5 kbps en el UL y de 106 kbps en el DL y, en comparación con el LTE-M, esta tiene mayor rango de cobertura.

En cuanto a modulaciones, utiliza OFDMA en el DL, con un espaciado de 15 kHz entre portadoras, y SC-FDMA en el UL, con espaciados de 15 kHz y 3.75 kHz. Por último, en cuanto a los rangos de cobertura, se establece un rango de en torno a 1 km en entornos urbanos y de 10 km en zonas rurales.

## 3.2. Tecnologías de corto alcance

Las tecnologías de corto alcance se utilizan en aplicaciones IoT para mantener conectada un área de no mucho rango. No son capaces de abordar requerimientos de alcance, capacidad y eficiencia energética. Sin embargo, pueden permitir las comunicaciones M2M y se pueden desplegar en muchos entornos. Las principales tecnologías utilizadas para ello son WiFi, ZigBee y Bluetooth.

### 3.2.1. WiFi

Se trata de una de las tecnologías más utilizadas en todo el mundo, desde redes domésticas como de trabajo. Está estandarizada como IEEE 802.11 y se usa en redes WLAN.

Esta tecnología ofrece una gran cobertura y las mayores tasas dentro de esta categoría. Además, permite conexión entre sus dispositivos, a tasas superiores y con menor latencia. Sin embargo, el consumo de potencia es superior.

El estándar que se lanzó para dar soporte a aplicaciones IoT fue el 802.11ah, que reduce el consumo de potencia y ofrece mayor rango. Opera en subbandas de 1 GHz sin licencia y los anchos de banda utilizados son de 1 o 2 MHz, siendo permitidas bandas de hasta 16 MHz en algunos países. Este último tiene como objetivo dar cobertura de hasta 1 km a bastantes dispositivos con tasas de hasta 300 Mbps [10].

### 3.2.2. ZigBee

Es una tecnología creada para conectar dispositivos en una red WPAN y fue estandarizado en IEEE 802.15.4 como protocolo de capa física y capa de enlace. Opera en las bandas sin licencia de 868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz, dividiendo dichas bandas en 16 canales de 2 MHz de ancho de banda cada uno. Además, se utiliza modulación DSSS, se puede llegar a conseguir hasta 250 kbps de tasa binaria y se usa CSMA/CA como método de acceso al medio.

Se utiliza en redes WSN para aplicaciones de automatización de espacios comerciales y domésticos, monitorización de plantas industriales, de salud, etc. Estas redes de sensores pueden tener tres topologías distintas, todas ellas con un máximo de 255 dispositivos conectados, como son la topología en estrella, la topología mallada y la topología en árbol. Además, los dispositivos comentados pueden ser de tres tipos:

- **Coordinadores**, son los responsables del control y establecimiento de conexiones en la red. Además, eligen los parámetros de configuración de la red y almacenan información de la red como las claves de seguridad.
- **Encaminadores**, que realizan la funcionalidad de encaminamiento de datos y que actúan como conectores entre distintos nodos de la red. Pueden comunicarse con otros encaminadores de la red.
- **Dispositivos finales**, los cuales tienen la función de conectarse con un encaminador o coordinador y no pueden enviarse mensajes de datos entre ellos.

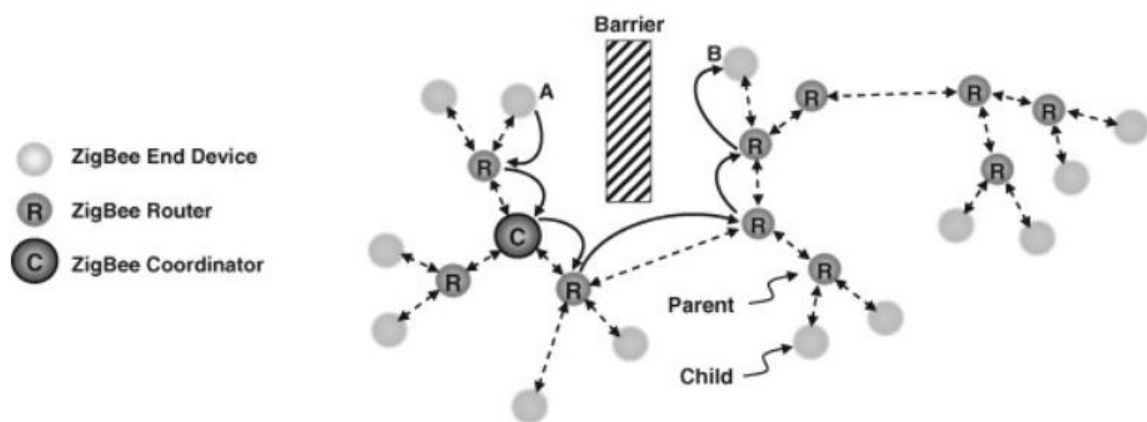


Figura 10. Ejemplo de arquitectura ZigBee [15].

En definitiva, ZigBee es una buena alternativa para aquellas aplicaciones IoT de corto alcance que no supongan un gran número de dispositivos y por la baja latencia entre dispositivos que presenta, pero las limitaciones comentadas anteriormente hacen que otras alternativas, como Bluetooth, sean mejores elecciones.

### 3.2.3. Bluetooth

Es una especificación gestionada por Bluetooth SIG y estandarizada en el IEEE 802.15.1, donde se definen las características de radiofrecuencia para la capa física y la capa de enlace. Se utiliza en comunicaciones inalámbricas de corto alcance, operando en bandas ISM desde 2.402 a 2.48 GHz, consiguiendo unas tasas de 1 a 3 Mbps.

A lo largo de los años, se ha ido adaptando a las necesidades de los demandantes, desde ofrecer mayores tasas binarias a proporcionar un rango de distancia mayor. Es por esto por lo que, hoy en día, se han desarrollado una totalidad de 6 versiones distintas. La última es la versión 5.0, que está pensada originalmente para aplicaciones IoT. Se consigue así una transmisión continua de datos de forma segura, con alto grado de fiabilidad y de muy

baja potencia. Además, esta versión proporciona un alcance de 100 metros como máximo y se consigue el doble de tasa binaria que la versión anterior.

La arquitectura de red en la que están conectados los dispositivos se conoce como *piconet*. En ella, un dispositivo se denomina maestro y el resto son esclavos. El maestro es el que se encarga de fijar los saltos de frecuencia y los esclavos se tienen que sincronizar. Además, el maestro de una *piconet* puede ser esclavo de otra, formando conexiones de *piconets* que se conocen como *scatternets*.

El principal inconveniente de esta tecnología es el número de dispositivos que pueden conectarse en una red. Por esto, para hacer posible el uso del BLE dentro de aplicaciones IoT de larga escala, se pasó a la implementación de redes malladas, o *mesh networks*. Esta nueva topología utiliza el principio de enrutamiento de inundación para reenviar los datos de un dispositivo a otro, pudiendo conectar un máximo de 32767 dispositivos.

Por esto, Bluetooth se ha convertido en la tecnología de corto alcance más utilizada para aplicaciones IoT, siendo usada, por ejemplo, en control y monitorización de edificios inteligentes o en la automatización de servicios domésticos [15].



## 4. Sistemas en estudio

A lo largo del presente trabajo se han desarrollado conceptos claves del IoT, como son la estructura básica, sus protocolos y los elementos que lo integran, al igual que se ha listado algunas de las tecnologías del IoT que más se utilizan hoy día. En este capítulo, se pasa a tratar dos sistemas que integran dos de dichas tecnologías, como son GPRS y LoRa. Además, se presentarán los dispositivos y sensores utilizados para el desarrollo de las pruebas que serán mostradas en el siguiente capítulo.

### 4.1. Sistema LoRa

#### 4.1.1. Esquema de comunicación

El esquema de comunicación en el escenario utilizado para el estudio de la tecnología LoRa es el siguiente:



*Figura 11. Esquema de comunicación para el escenario LoRa.*

El escenario comienza con la toma de datos por parte de los sensores que están conectados al dispositivo de campo de Ornavera. Estos sensores pueden ser de varios tipos, en cuanto a medidas que recogen se refiere. Pueden estar conectados en el suelo, en el tallo de la hoja, en la parte superior del dispositivo para captar luz, etc.

Cuando culmina el proceso de medida, se pasa a la transmisión de los datos recogidos a través de la capa física de LoRa. Una vez se consigue realizar la conexión con la pasarela LoRa, se transmiten los datos y el dispositivo de campo se queda esperando el ACK. Cuando lo recibe, termina la iteración y el dispositivo entra en modo de bajo consumo.

Al obtener los datos la pasarela, esta comprueba si tiene conexión a internet, ya que posee de un módulo conectado directamente a la red de internet. En caso de tener conexión, envía directamente los datos a la dirección IP en la que esté conectada la base de datos. Sin embargo, en caso contrario, almacena las medidas en una tarjeta SD para su posterior envío mediante internet.



Este esquema representa un esquema típico de una arquitectura LoRa, tal y como se muestra en [16]:

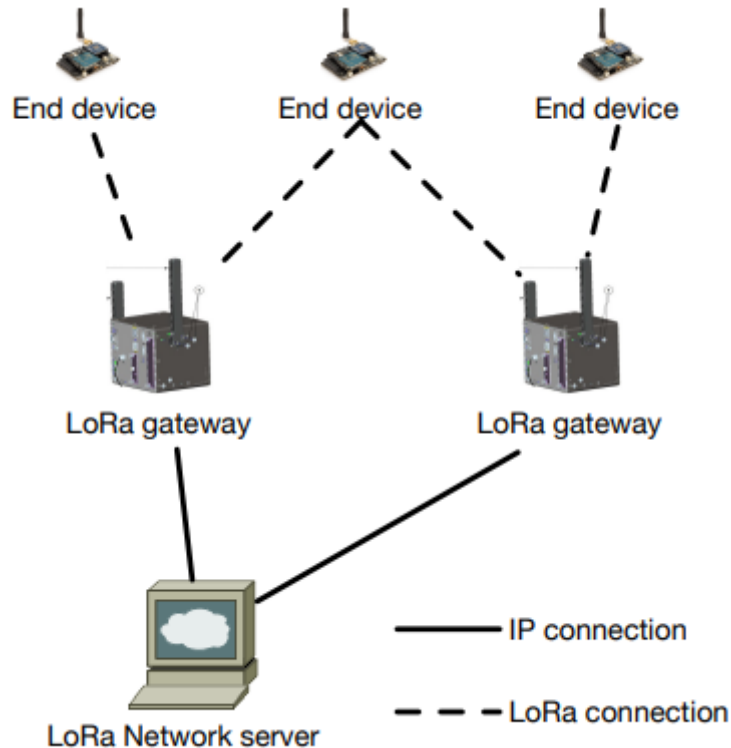


Figura 12. Arquitectura típica de una red LoRa [16].

La arquitectura propuesta coincide en cierta manera con la estructura típica conocida como topología de estrella de estrellas. En ella se incluyen tres tipos de dispositivos [16]:

- Dispositivos finales que se comunican con las pasarelas de LoRa utilizando LoRaWAN.
- Pasarelas que reenvían las tramas LoRaWAN sin procesar desde los dispositivos al servidor de la red LoRa a través de una interfaz, como, por ejemplo, Ethernet.
- El servidor de la red LoRa, que se encarga de decodificar los paquetes que envían los dispositivos finales a las pasarelas y generan los mensajes de respuesta que envían de vuelta las pasarelas a dichos dispositivos.

La diferencia entre el esquema típico y el que se utilizará en este trabajo es que la pasarela hace la función de decodificación y generación de respuesta que hace el servidor de la red de la estructura típica. Es decir, la pasarela del esquema de la figura 11 hace el papel de pasarela LoRa y de servidor de la red LoRa al mismo tiempo.

La capa física de LoRa es una modulación de espectro ensanchado de chirp, que hace uso de chirps de frecuencia con variación lineal de frecuencia a lo largo del tiempo para codificar información [16]. Debido a la linealidad de los pulsos chirps, las compensaciones en frecuencia entre receptor y transmisor son equivalentes a las compensaciones de tiempo, cosa que puede ser eliminada en el proceso de decodificación. Además, esta modulación es inmune al efecto Doppler. La compensación en frecuencia entre transmisor y receptor puede alcanzar hasta el 20 por ciento del ancho de banda sin influir en la decodificación. Esto hace que el coste de los transmisores se reduzca.

La duración de un símbolo LoRa es mayor que las ráfagas típicas generadas por sistemas que usan modulación FHSS, por lo que los errores generados por esta interferencia se corrigen con códigos FEC. También pueden ser utilizadas técnicas de modulación diferencias o no coherente en la que pequeños paquetes son transmitidos como en [17, 18].

Pasando a los parámetros configurables de la modulación nos encontramos con el ancho de banda (BW), el factor de ensanchado (SF) y la tasa de código (CR). El factor de ensanchado está definido en base 2, algo no convencional que es utilizado en LoRa. Estos tres parámetros influyen de manera contundente en la tasa efectiva de bits de la modulación, la resistencia a interferencias y la facilidad de decodificación.

El parámetro más importante dentro de la modulación es el ancho de banda, ya que es igual a la tasa de chirp disponible. Esto influye de manera que, en caso de aumentar el factor de ensanchado en una unidad, se divide a la mitad el intervalo de frecuencia de un chirp y se dobla la duración del símbolo. Se concluye entonces con que la tasa de bits y la tasa de símbolos es proporcional al ancho de banda.

En términos de sensibilidad del codificador, un aumento del ancho de banda reduce la sensibilidad del receptor, mientras que el aumento del factor de ensanchado la aumenta. Además, disminuir la tasa de código hace que la tasa de error de paquetes se reduzca.

#### 4.1.2. Diagrama de paso de datos

El diagrama de paso de datos se muestra en la figura 13. En primera instancia, el dispositivo se enciende una vez ha concluido el proceso de hibernación. El proceso de hibernación se utiliza para el ahorro de batería de los dispositivos finales del sistema, que son los que se encuentran en el terreno a controlar. Tras esto, se procede a entrar en el proceso de generación y envío del mensaje.

Al entrar en el bucle de la iteración, se da alimentación a los pines en los que están conectados los sensores que captan los datos. El proceso de lectura de dichos sensores se puede realizar mediante comunicación Serial, I2C o RS-485, accediendo a los registros de estos.

En segundo lugar, se configura el módulo LoRa que se encuentra instalado en la placa y se comprueba que exista una baliza en la que poder enviar los datos recogidos a la pasarela del esquema de comunicación.

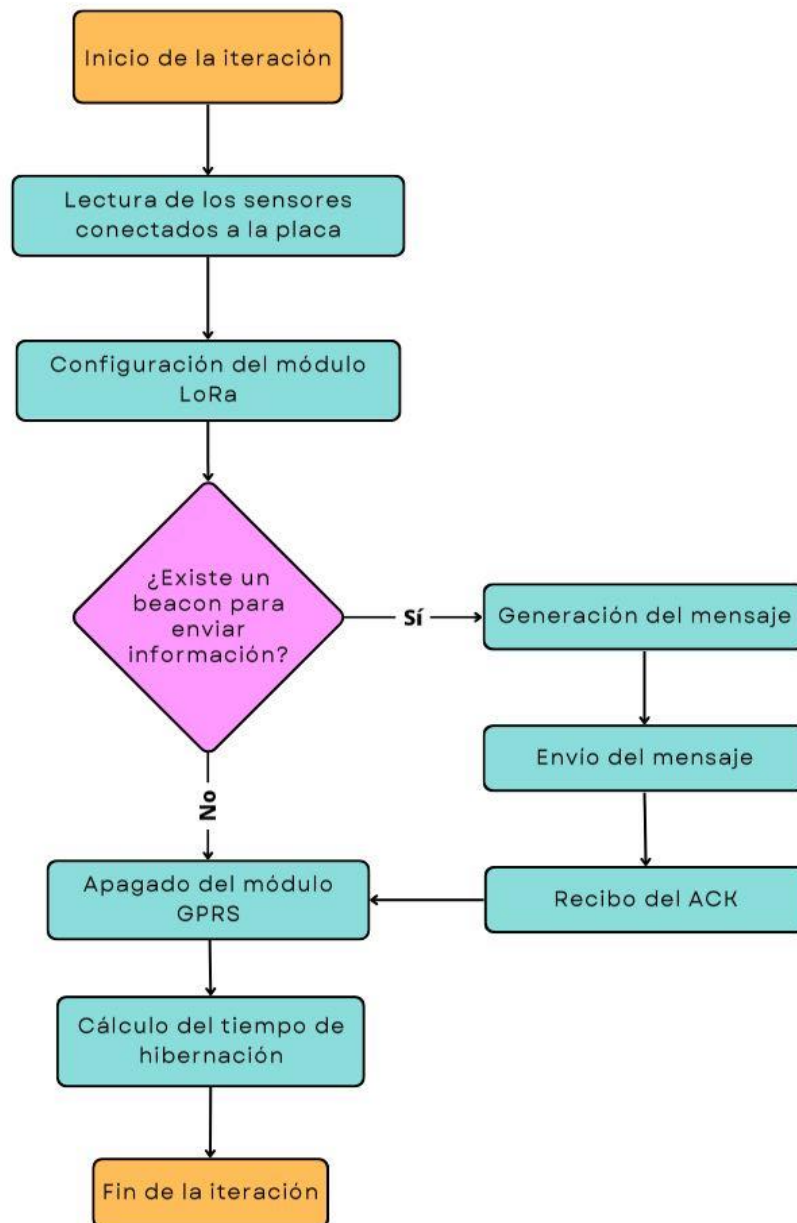


Figura 13. Diagrama de paso de datos en caso de dispositivo LoRa.

En caso de existir una baliza para enviar la información, se procede a generar el mensaje, que incluye el proceso de anidación de valores y de codificación del mensaje. Una vez generado el mensaje a enviar, se manda dicha información en el slot de tiempo que se ha reservado para ello y el dispositivo transmisor se queda esperando el ACK por parte de la pasarela.

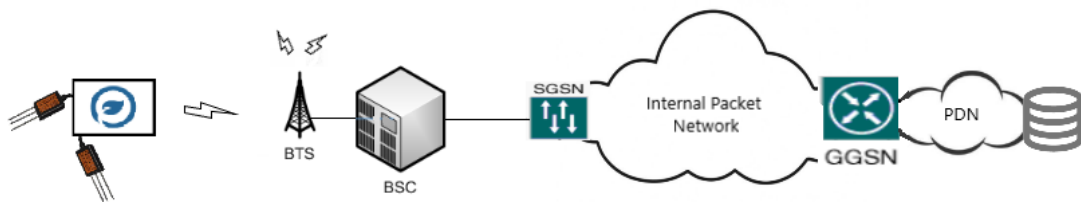
Si el ACK llega, no llega o no existe una baliza en la que enviar la información se procede a apagar el módulo LoRa. Por último, se procede a calcular el tiempo de hibernación que el dispositivo estará dormido antes de la siguiente iteración.

Con esto finaliza el envío de datos en el caso de que se utilice LoRa como tecnología del sistema.

## 4.2. Sistema GPRS

### 4.2.1. Esquema de comunicación

El esquema de comunicación utilizado en el caso de la tecnología GPRS es el siguiente:



*Figura 14. Esquema de comunicación para el escenario GPRS.*

El esquema comienza con la toma de los datos por parte de los sensores instalados en el cultivo que se quiere monitorizar. Cada cierto tiempo, que es un parámetro configurable, se realizan medidas por parte del dispositivo, que activa dichos sensores, obtiene los datos y realiza la transmisión a la estación más cercana.

El transmisor se conecta mediante el uso de la placa GPRS que tiene conectada y la antena instalada en dicha placa a una estación transreptora base, conocida por las siglas BTS. Esta estación se conecta a un controlador de estaciones base (BSC), con el que se entra a la red GPRS [16].

Dentro de esta red GPRS, existen lo que se conocen como nodos de soporte GPRS o GSN, que son los extremos de la red GPRS por donde pasará la información en su camino hacia la base de datos final. Estos nodos son SGSN y GGSN. La conexión entre ellos se habilita mediante un protocolo llamado GTP (“*Tunelling Protocol*”). En términos de estándares de GRPS, esta conexión entre los nodos se conoce como interfaces.

La interfaz que conecta el SGSN con el GGSN se conoce como interfaz Gn. Esta interfaz utiliza IP como protocolo de enrutamiento. Los paquetes que se envían mediante la interfaz

Gn se encapsulan utilizando el protocolo GTP mencionado anteriormente. Aunque esto genere sobrecarga, ya que la encapsulación mediante este protocolo hace que la información aumente, es beneficioso por el hecho de que la flexibilidad del enrutamiento de paquetes. Esta flexibilidad radica en que, aunque el destino del paquete IP con la información entrante en el SGSN cambie, la canalización es transparente dentro de la red GPRS, ya que, si esta dirección cambia, solo se tiene que informar al GGSN del nuevo SGSN responsable del suscriptor.

Para llegar a la red privada, será necesario identificar el APN o punto de acceso al que se tendrá que acceder para almacenar la información. En el proceso de conexión con el servidor, se conectará al APN. El APN identifica la parte de la red donde se establece una sesión de usuario y sirve como referencia para llegar a un GGSN [16]. Este punto lo proporcionará el dispositivo con el que nos conectaremos a la red GPRS, siendo enviado mediante un mensaje de solicitud de creación de contexto PDP, mediante el que el usuario solicita establecer una sesión y encaminar la información dentro de la red desde el SGSN hasta el GGSN.

En [13] se puede observar el paso de mensajes entre todas las entidades del escenario hasta conseguir la dirección IP del GGSN por donde pasará la información que llegará a la base de datos. El proceso es el siguiente:

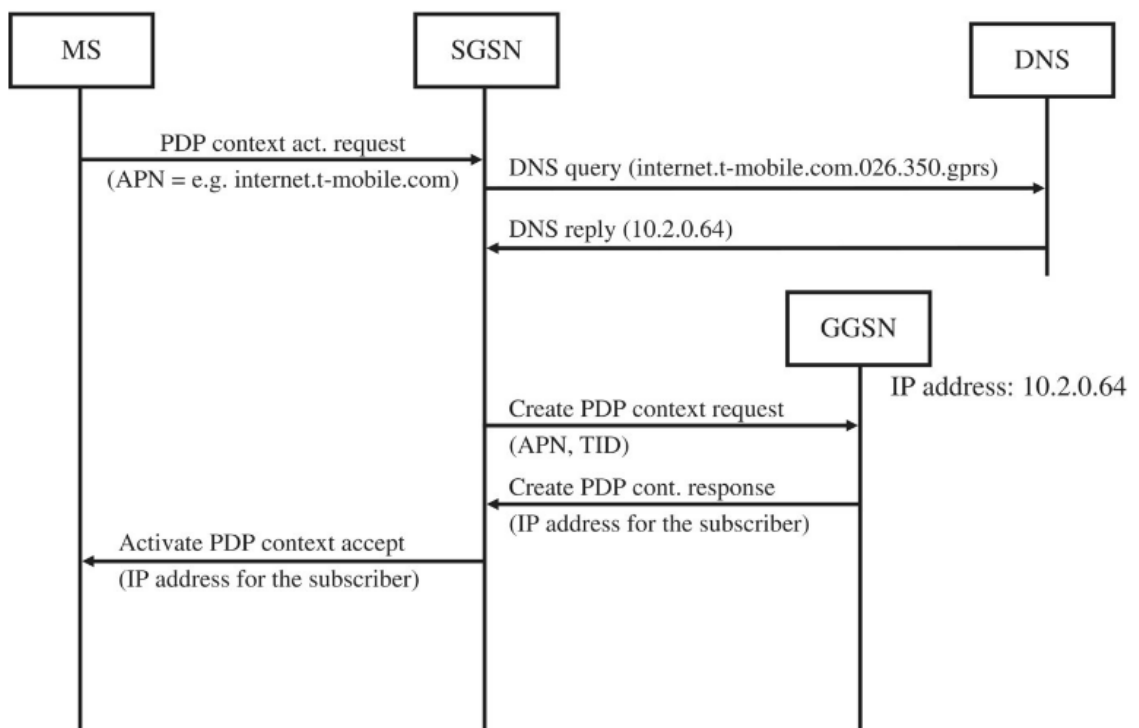


Figura 15. Activación del contexto PDP [13].

Una vez el SGSN obtiene el APN donde se desea enviar la información a almacenar, este se compara con una lista de APN permitidos para el suscriptor que se ha recibido por parte

del HLR. Tras esto, el SGSN realiza una búsqueda DNS utilizando el APN recibido como el nombre del dominio a buscar y se obtiene así la dirección IP del GGSN al que se redirigirá la información.

Una vez se pasa la información desde el SGSN hasta el GGSN, este realiza el papel de enrutador entre la red interna GPRS y la red privada a la que esté conectada la base de datos donde se quieren almacenar los datos. La interfaz de conexión entre el elemento GGSN y la red privada se conoce como interfaz Gi.

#### 4.2.2. Diagrama de paso de datos

Como sucede en el caso de LoRa, el diagrama representa una iteración que realiza el dispositivo desde que se enciende tras el proceso de hibernación hasta que se vuelve a dormir para ahorrar energía. El diagrama es el siguiente:

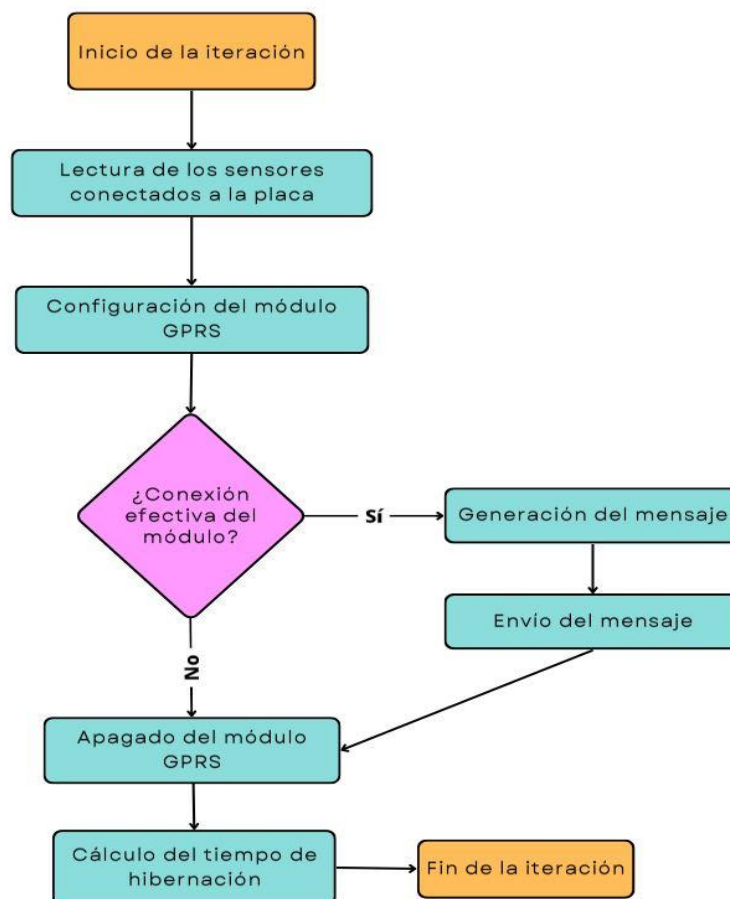


Figura 16. Diagrama de paso de datos en caso de dispositivo GPRS.

En primera instancia, el dispositivo se enciende tras el proceso de hibernación. Tras esto, se procede a entrar en el proceso de generación y envío del mensaje.

En primer lugar, se encienden las vías que alimentan a los sensores que se encuentren conectados a la placa. Tras esto, se empieza a leer mediante comunicación Serial, I2C o RS-485 los registros de cada sensor.

En segundo lugar, se configura el módulo GPRS que se encuentra instalado en la placa y se comprueba su correcta disposición necesaria para proceder a enviar el mensaje. En caso de haber configurado y conectado con el módulo GPRS de forma correcta, se procede a la generación del mensaje que llevará los datos recogidos por parte de los sensores hasta la base de datos donde se almacenan. Cuando se genera el mensaje, este se envía utilizando el esquema de comunicación comentado en el apartado anterior.

Por último, se desconectan las vías de comunicación con los sensores, quitándole así la alimentación a estos y se desactiva el módulo GPRS. Esto se realiza por el hecho del ahorro de batería necesario en este tipo de sistemas. Tras esto, se recalcula el tiempo de hibernación teniendo en cuenta el tiempo que ha durado la iteración actual y el tiempo configurado entre medidas y se procede a entrar en modo de bajo consumo hasta que se entre en la siguiente iteración.

## 4.3. Dispositivos utilizados

### 4.3.1. Sensor MEC10

El sensor MEC10 se utiliza para medir la humedad, la conductividad eléctrica y la temperatura de la superficie en la que se dispone. Es capaz de medir dichos parámetros con alta precisión y sensibilidad [20].

Se trata de un sensor de gran utilidad para hacer un estudio de la aparición, mejora y de la dinámica hídrica de los suelos salinos. Con la medida del parámetro de la constante dieléctrica del suelo, se puede obtener el volumen real del suelo en cualquier instante.

Para la comunicación con el dispositivo encargado de enviar las medidas a la base de datos se utiliza el protocolo Modbus, a través de una interfaz RS-485. Modbus es un protocolo de comunicación serie utilizado por gran variedad de dispositivos inteligentes dentro del IoT. Utiliza una arquitectura maestro-esclavo. Cada dispositivo tiene una dirección única.

Los valores por defecto de esta comunicación serie son 9600 BPS, un bit de comienzo, 8 bits de datos, un bit de paridad y un bit de fin.

El registro de Modbus de este MEC10 comienza con el valor de la temperatura, devolviendo un valor hexadecimal, el cual se tendrá que traducir a decimal, cosa que



realiza el firmware del dispositivo. Tras la temperatura se encuentran el campo del contenido volumétrico del agua, la conductividad eléctrica, la salinidad, la cantidad de sólidos disueltos y la constante dieléctrica. Para conocer más características sobre este sensor, ver anexos.



Figura 17. Sensor MEC10 utilizado.

#### 4.3.2. Sensor de temperatura y humedad

Se trata de un sensor similar al anterior, pero que es capaz de medir la temperatura y la humedad relativa del suelo donde se conecta [21].

La metodología de comunicación es igual al anterior sensor, utilizando comunicación serie con protocolo Modbus. La interfaz que utiliza para dicha comunicación también es RS-485. El registro de este sensor está formado por el valor de la temperatura, el valor de la humedad relativa, la dirección del dispositivo y la tasa de baudios. Para más características sobre este sensor, ver anexos.



Figura 18. Sensor de temperatura y humedad utilizado.



### 4.3.3. Pruebas realizadas

Las pruebas realizadas se han hecho utilizando los dispositivos y sensores cedidos por Ornavera, así como por su herramienta de visualización de datos, donde los clientes pueden observar el estado de sus cultivos y plantaciones y, poder de esta manera, actuar sobre estos en caso de que sea necesario.

Por una parte, para el caso de LoRa es necesario un dispositivo final donde se conectará un sensor MEC10 y una pasarela receptora que estará conectada a la red local de internet para conectarse vía IP con la base de datos.

Por otra parte, en el caso de GPRS solo es necesario un dispositivo donde se conecte un sensor o sensores. Este dispositivo tendrá instalada una tarjeta SIM y un módulo GPRS que le permita conectarse a la red GPRS y enviar los datos medidos utilizando el esquema explicado anteriormente. Para este caso he utilizado tanto un sensor MEC10 como un dispositivo de temperatura y humedad.

Para ambos casos, las pruebas realizadas son:

- **Comprobación del correcto funcionamiento del sistema.** Se realizarán medidas continuas espaciadas en 10 minutos cada una, que es el tiempo configurado como tiempo de reposo o tiempo de hibernación del dispositivo. Este periodo se define como consecuencia del modo de bajo consumo que es característico de este tipo de sistemas.
- **Comprobación del nivel de señal en distintas localizaciones.** Para cada sistema se dispondrán los dispositivos en distintos lugares y se llevarán a cabo una serie de envíos con información relativa a la señal captada por los módulos de comunicación instalados en las placas de los dispositivos.
- **Medición del tiempo de envío y recepción de las medidas en la base de datos.** Con esta prueba se busca conocer el tiempo medio desde que el dispositivo se conecta a la red del sistema de comunicación y llegan los datos a la base de datos final. De la misma manera, se enviará una serie de medidas a la base de datos para conocer así el tiempo medio de todos esos envíos.
- **Medida del tiempo entre iteraciones.** Esta prueba trata de medir el tiempo en el que el dispositivo está activo, desde que se enciende tras la hibernación hasta que vuelve a dicho periodo tras enviar el mensaje y/o recibir el ACK correspondiente.
- **Degradación de la batería.** Con esta prueba se busca comprobar que, conforme mayor sea el tiempo entre las iteraciones de medida de los dispositivos, mayor será el valor de batería consumido.

## 5. Resultados

Tras haber descrito las pruebas a realizar, en este capítulo se procede a mostrar los resultados de dichas pruebas. El capítulo estará dividido en dos apartados principales para cada uno de los sistemas en los que se ha profundizado a lo largo del trabajo. Los resultados serán mostrados a partir de tablas que recogerán los datos necesarios y de gráficas que sirvan para asimilar dichos datos de una manera más visual para el lector.

### 5.1. Escenario LoRa

#### 5.1.1. Comprobación del funcionamiento del sistema

Como ya se ha comentado, el escenario de prueba para la comunicación LoRa consistía en la utilización de un sensor MEC10 al dispositivo final. Este sensor es capaz de medir varios parámetros que pueden resultar de utilidad para la monitorización de los cultivos o superficies por parte del cliente.

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema de comunicación se utilizará la herramienta de representación gráfica que proporciona Ornavera a sus clientes para que puedan hacer el seguimiento de monitorización que ellos deseen. La siguiente imagen muestra los datos recolectados por parte del dispositivo instalado en la superficie a controlar que han llegado a la base de datos:

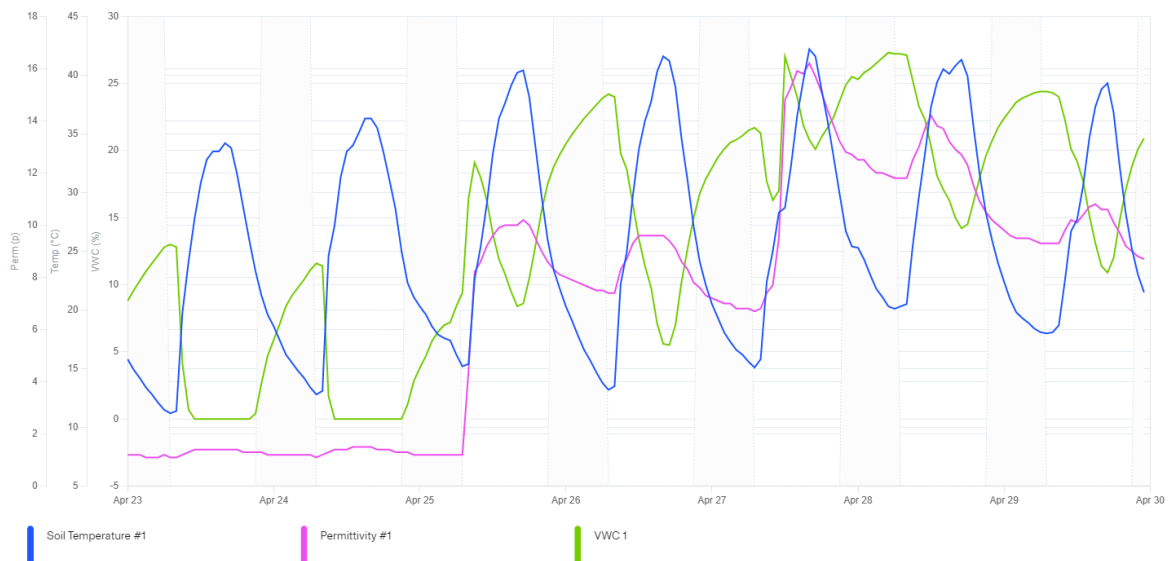


Figura 19. Datos recogidos por el sensor conectado al dispositivo.

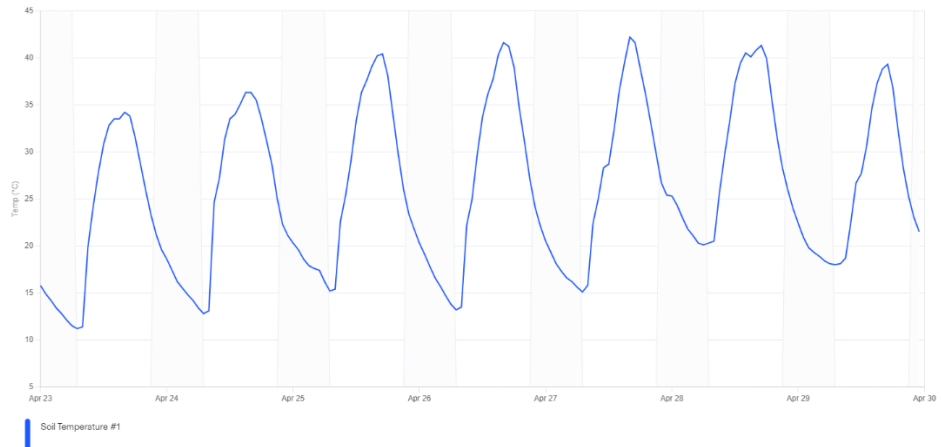


Figura 20. Temperatura del suelo registrada por el dispositivo.

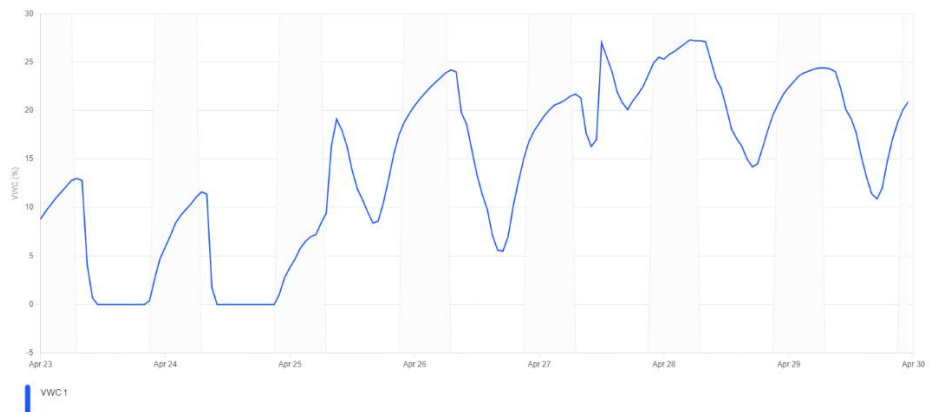


Figura 21. Contenido volumétrico del agua registrado por el sensor MEC10.

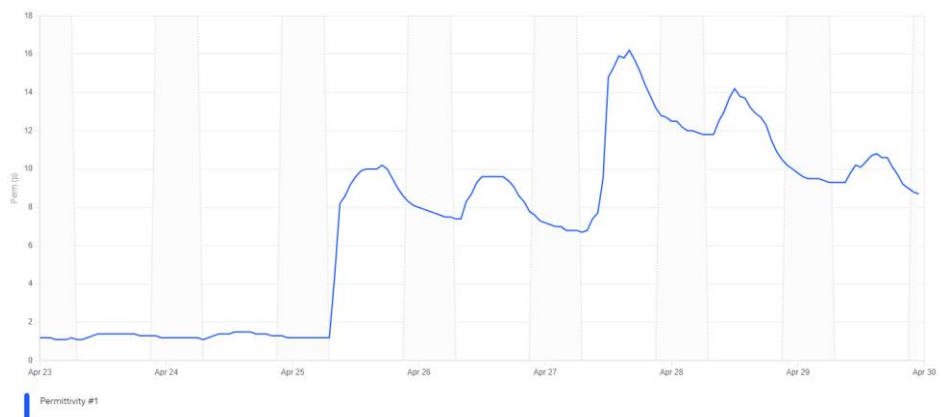


Figura 22. Permitividad registrada por el sensor MEC10.

Como se puede comprobar, el dispositivo ha estado recogiendo medidas de forma continuada para esta prueba y, en el caso de la imagen, se representan los valores en forma de gráfica de la temperatura del suelo, la permitividad del suelo y el contenido volumétrico del agua de dicha superficie.

### 5.1.2. Nivel de señal

Con esta prueba se quiere comprobar el nivel de señal necesario en tres posibles localizaciones del dispositivo transmisor de datos, para conocer los rangos en los que oscila el sistema de cara a una correcta comunicación entre el transmisor y la pasarela del sistema.

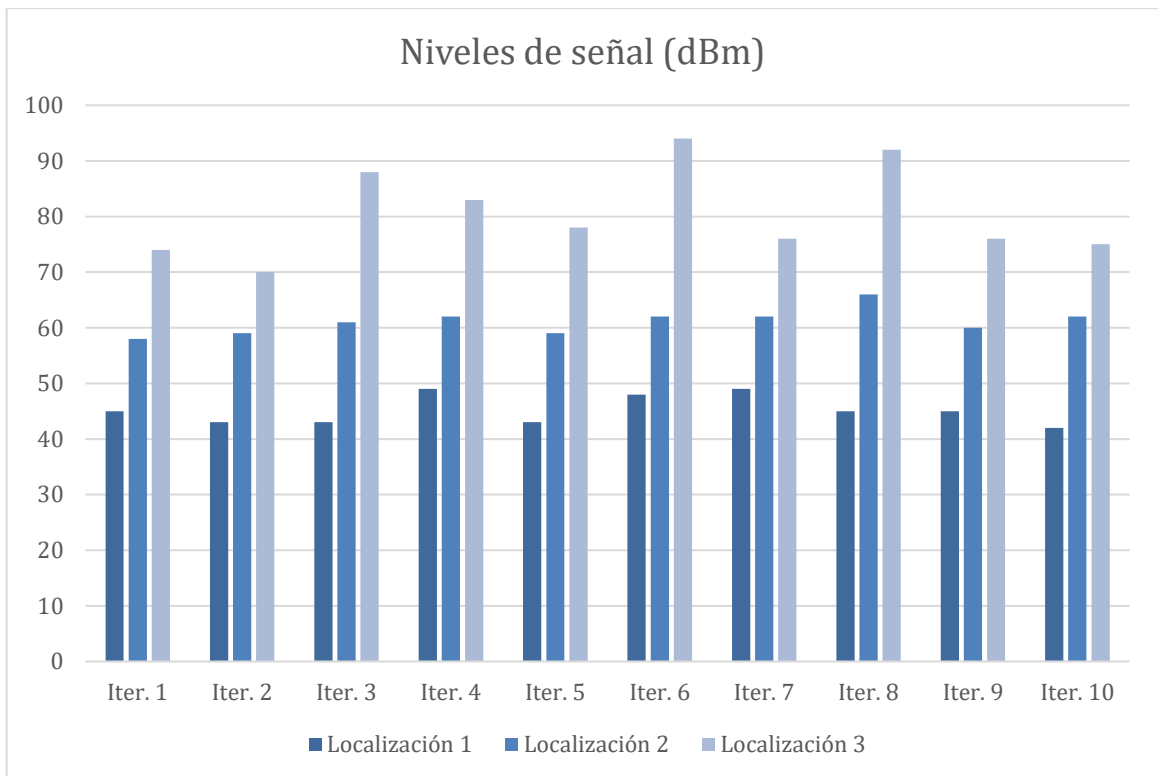
La localización 1 de la prueba se corresponde con una distancia entre el dispositivo y la pasarela de, aproximadamente, 2 metros, aunque con un obstáculo de por medio (pared). La localización 2 aumenta tanto la distancia a 10 metros y los obstáculos en la línea de comunicación. Por último, para la localización 3 ocurre lo mismo que en los dos casos anteriores y se aumenta la distancia a unos 20 metros.

La siguiente tabla muestra los valores de señal necesarios para establecer la comunicación. Se han realizado un total de diez iteraciones en cada localización.

Localización	Iteración	Nivel de señal (dBm)
1	1	-45
	2	-43
	3	-43
	4	-49
	5	-43
	6	-48
	7	-49
	8	-45
	9	-45
	10	-42
2	1	-59
	2	-58
	3	-61
	4	-62
	5	-59
	6	-62
	7	-62
	8	-66
	9	-60
	10	-62

<b>3</b>	1	-74
	2	-70
	3	-88
	4	-83
	5	-78
	6	-94
	7	-76
	8	-92
	9	-76
	10	-75

Trasladando estos valores a un gráfico de barras, siendo los valores representados los absolutos de la tabla:



Como se puede observar, ocurre el comportamiento esperado. Conforme aumenta la distancia y la cantidad de obstáculos, el nivel de señal necesario para que los datos lleguen hasta la pasarela aumenta.

Cabe comentar que, en caso de utilización real en monitorización de superficies, los dispositivos estarían instalados al aire libre. Por lo tanto, los obstáculos existentes en la línea de visión directa entre la antena transmisora y la receptora será la vegetación del entorno del dispositivo, en caso de existir.

### 5.1.3. Duración de las iteraciones

En esta prueba se trata de medir el tiempo que permanece activo el dispositivo desde que despierta del periodo de hibernación hasta que vuelve a dormirse por el modo de bajo consumo.

Este tiempo puede variar en cada iteración, debido a que, para poder mandar un mensaje a la pasarela, el dispositivo tiene que obtener una baliza disponible en la que enviar la información. Para cada frecuencia de trabajo, dentro de la banda espectral en la que se mueven los dispositivos, estos tienen hasta cuatro balizas disponibles.

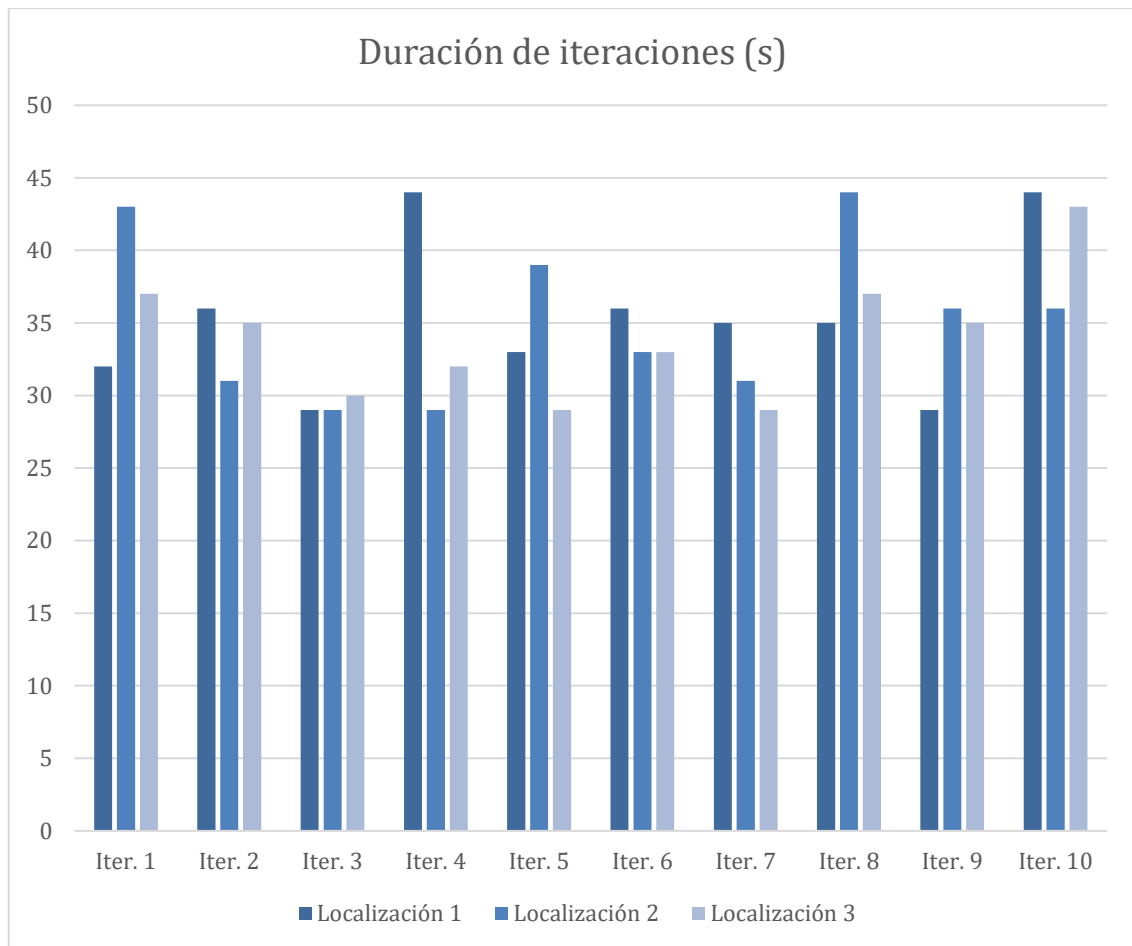
Por tanto, el tiempo de duración de cada iteración corresponde al tiempo que el dispositivo está activo desde que se despierta, realiza la toma de datos de los sensores conectados, activa el módulo LoRa, obtiene una baliza con la que enviar dicha información, recibe el ACK de la pasarela y se vuelve al modo de hibernación.

La siguiente tabla muestra los distintos tiempos de iteración que ha tardado el dispositivo en enviar la información usando los tres casos de la prueba anterior:

Localización	Iteración	Tiempo de duración de la iteración (s)
1	1	32
	2	36
	3	29
	4	44
	5	33
	6	36
	7	35
	8	35
	9	29
	10	44
2	1	43
	2	31
	3	29
	4	29
	5	39
	6	33
	7	31
	8	44
	9	36
	10	36

<b>3</b>	1	37
	2	35
	3	30
	4	32
	5	29
	6	33
	7	29
	8	37
	9	35
	10	43

Al igual que en la prueba anterior, pasando estos datos a un diagrama de barras, obtenemos una representación más visual:



En este caso, tener el dispositivo en distintas localizaciones que estén situadas a distinta distancia no afecta en el tiempo en el que el dispositivo está encendido. Esta duración depende de, como ya se ha explicado, el tiempo necesario para encontrar una baliza disponible donde enviar la información.

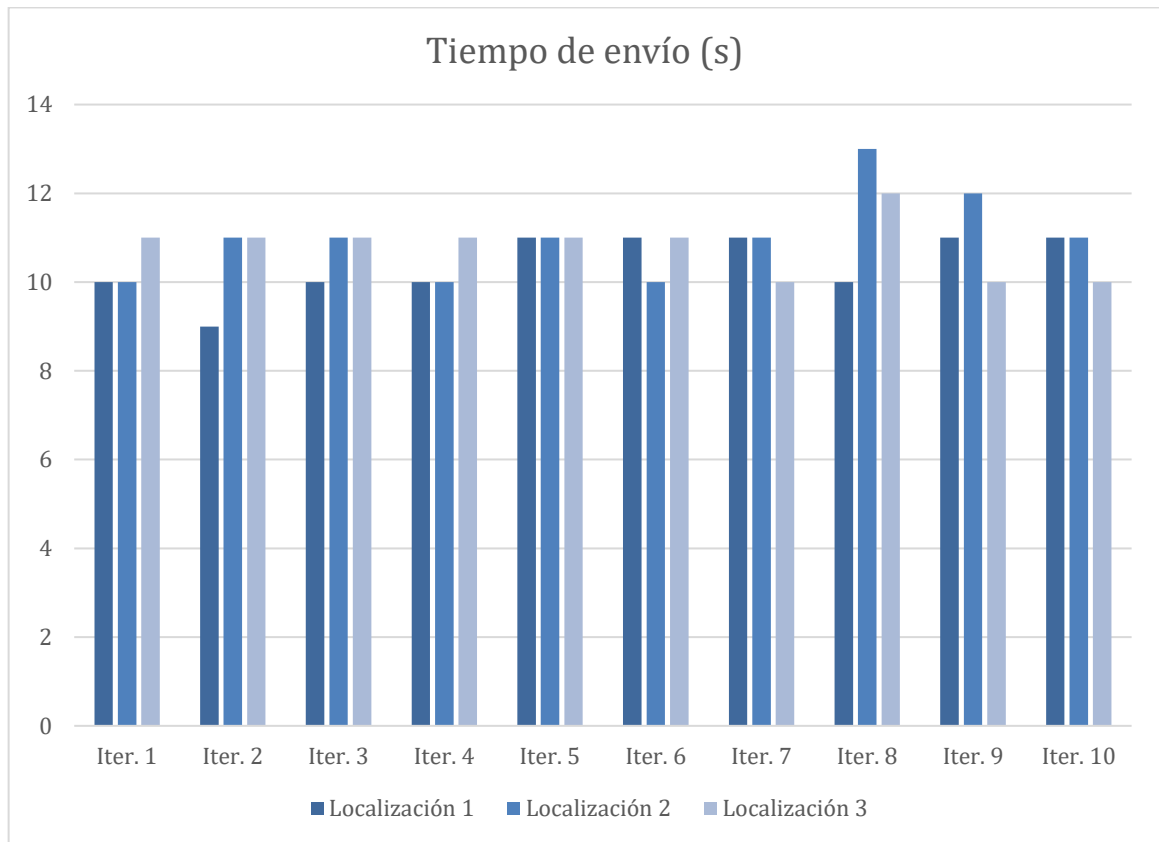
### 5.1.4. Tiempo de envío a la base de datos

Esta prueba consiste en revisar el tiempo que tarda en llegar el mensaje con los datos recogidos por el dispositivo del terreno a monitorizar desde la pasarela LoRa hasta la base de datos, la cual se encuentra en una dirección IP de internet. Por lo tanto, esta duración dependerá de la localización de la pasarela y del entramado IP que tenga que recorrer el paquete de datos hasta su llegada y posterior inclusión en la base de datos.

Como se ha hecho en la prueba anterior, se ha utilizado las mismas iteraciones que en la prueba del nivel de señal para obtener los datos de esta prueba. Con esto, obtenemos lo siguiente:

Localización	Iteración	Tiempo de envío a la BBDD (s)
1	1	10
	2	9
	3	10
	4	10
	5	11
	6	11
	7	11
	8	10
	9	11
	10	11
2	1	10
	2	11
	3	11
	4	10
	5	11
	6	10
	7	11
	8	13
	9	16
	10	14
3	1	11
	2	11
	3	11
	4	11
	5	11
	6	11
	7	10
	8	12
	9	10
	10	10





Se puede observar que los tiempos de envío a la base de datos son muy similares. Esto era lo esperado, porque el camino IP que se establece entre la pasarela y la base de datos es similar en cuanto a recorrido para todos los paquetes enviados.

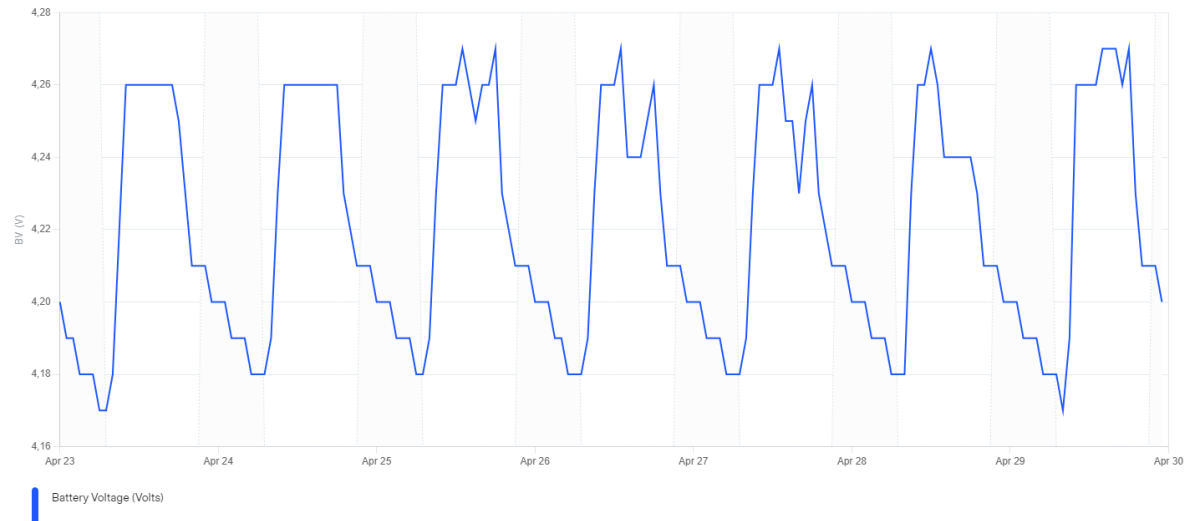
### 5.1.5. Duración de la batería

Esta prueba consiste en comprobar el ciclo de batería de los dispositivos, que tienen un sistema de recarga de la batería mediante el uso de una placa solar y un circuito específico para ello.

Por ello, el ciclo de carga de la batería se ve como una gráfica que decrece en horas en las que no se da incidencia de luz en la placa solar, mientras que en horas diurnas se recupera toda la batería perdida en dichas horas.

En un principio esta prueba iba a consistir en hacer un seguimiento de la batería desde un punto en el que estaba llena hasta que se descargase totalmente, enviando de forma continua mensajes de datos espaciados cada 10 minutos. Sin embargo, dado que el firmware que integra el dispositivo no es propio, si no de empresa, no he podido realizar modificaciones y se ha decidido adaptar la prueba para comprobar la funcionalidad del modo de bajo consumo y la durabilidad de las baterías a lo largo del tiempo.

Para el mismo lapso utilizado para la primera de las pruebas mostradas, es decir, la prueba de funcionamiento del sistema, el ciclo de batería ha sido el siguiente:



*Figura 23. Ciclo de carga de la batería en el escenario LoRa.*

Como se puede observar, el gasto de batería producido por el dispositivo y el sensor conectado a este, además de la activación del módulo para la comunicación con la pasarela LoRa se produce, como ya se ha comentado, entre las últimas horas del día y las primeras horas del día siguiente. Esto coincide con las horas en las que no hay luz.

También cabe mencionar que el gasto es reducido, debido al modo de bajo consumo que se integra en el firmware del dispositivo y que, entre otras cosas, hace que entre en modo de hibernación entre iteraciones, se desactiven los pines de conexión de sensores o se desactive el módulo de comunicación LoRa al recibir el ACK correspondiente.

## 5.2. Escenario GPRS

### 5.2.1. Comprobación del funcionamiento del sistema

En el escenario de prueba para la comunicación GPRS se utiliza, tal y como se comentó en el punto 4.3.3., un sensor MEC10 y un sensor de temperatura y humedad en el dispositivo final. Tal y como se ha mostrado en el caso de LoRa, se va a usar la herramienta de representación gráfica de Ornavera

Por tanto, siguiendo el mismo procedimiento que en el punto 5.1, la siguiente imagen muestra los datos recolectados por parte del dispositivo instalado en la superficie a controlar que han llegado a la base de datos:

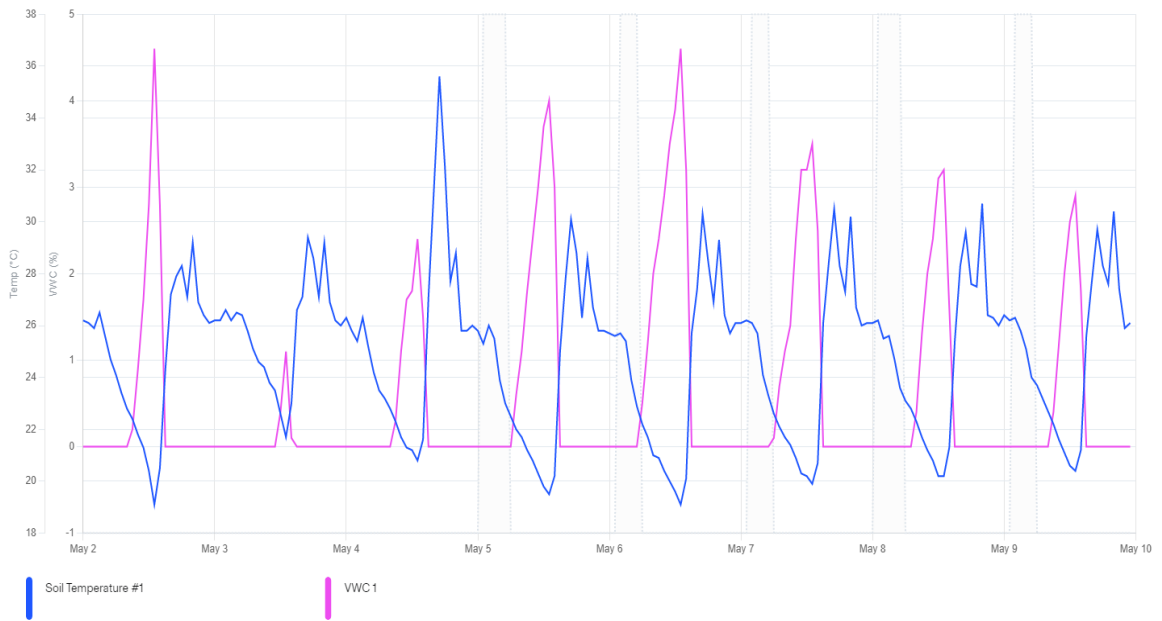


Figura 24. Datos recogidos por el sensor MEC10.

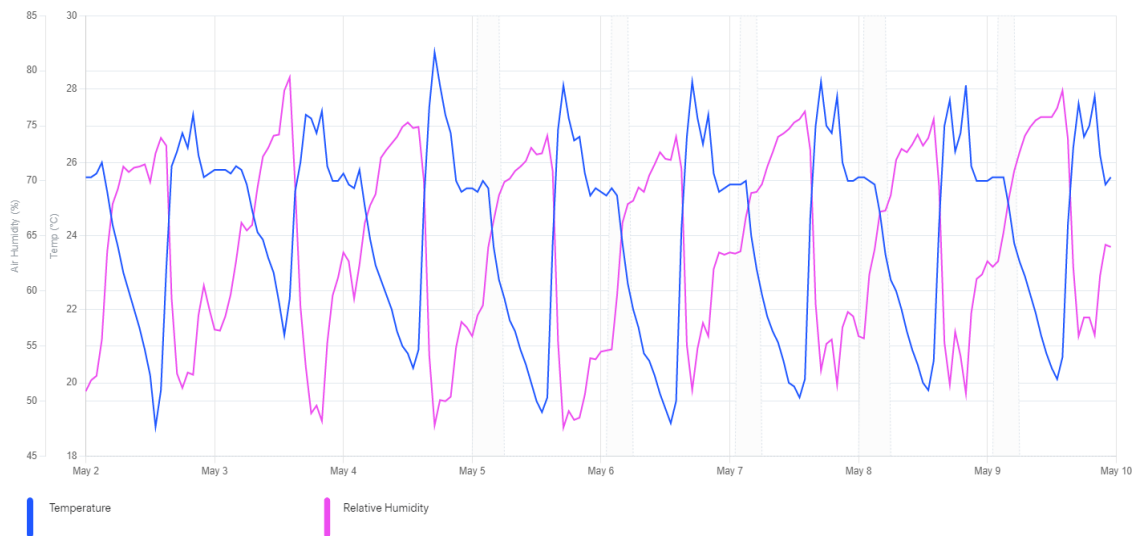


Figura 25. Datos recogidos por el sensor de temperatura y humedad.

Como puede comprobarse en las figuras anteriores, los datos recogidos por los sensores para el periodo en el que se realizaron las pruebas han llegado correctamente a la base de datos.

Por una parte, para la representación de los datos del sensor MEC10, se ha decidido mostrar los parámetros de temperatura y contenido volumétrico de agua del suelo. Por otra parte, en el caso del sensor de temperatura y humedad, se muestran los únicos parámetros que pueden medirse con dicho sensor.

## 5.2.2. Nivel de señal

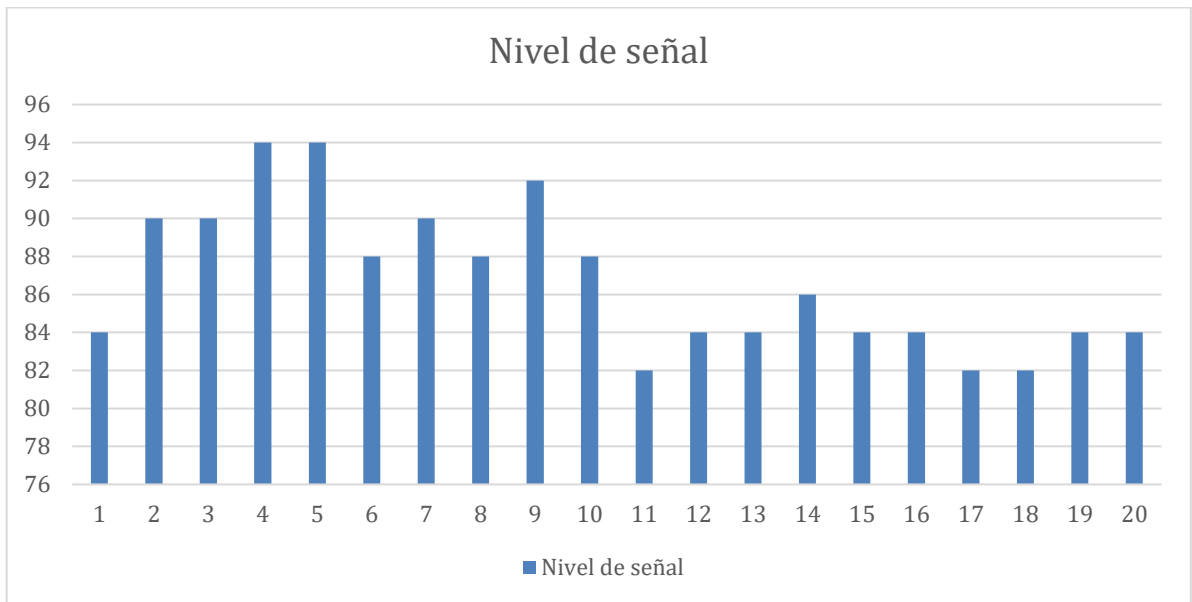
A diferencia de la prueba realizada en el caso del escenario LoRa, en este caso la localización y distancia al receptor no es sustancial para comprobar el nivel de señal. Esto se debe a que el receptor es una estación transceptora base y la geolocalización de esta no varía, como sí lo hacía en el caso de LoRa.

Por lo tanto, para esta prueba se realizarán un total de 20 iteraciones para obtener el nivel de la señal en cada una. La tabla siguiente muestra el valor de la señal con la que el módulo transmisor envía el mensaje con los datos que captan los sensores:

Iteración	Nivel de señal (dBm)
1	-84
2	-90
3	-94
4	-94
5	-88
6	-88
7	-90
8	-88
9	-92
10	-88
11	-82
12	-84
13	-84
14	-86
15	-84
16	-84
17	-82
18	-82
19	-84
20	-84

A la vista de los resultados que pueden observarse en la tabla, el nivel de señal medido oscila entre los -80 y -95 dBm. Como se ha comentado, la posición del dispositivo transmisor es estática, a diferencia de la prueba en el escenario LoRa. Por tanto, que los valores sean tan parecidos es lo esperado.

Tal y como se ha especificado en el escenario anterior, los dispositivos estarían monitorizando superficies que se encuentran al aire libre. Por esto, el nivel de señal en ese caso sería menor, aunque dependerá de la línea de visión entre el dispositivo y la localización de la estación base más cercana que soporte comunicación GPRS.

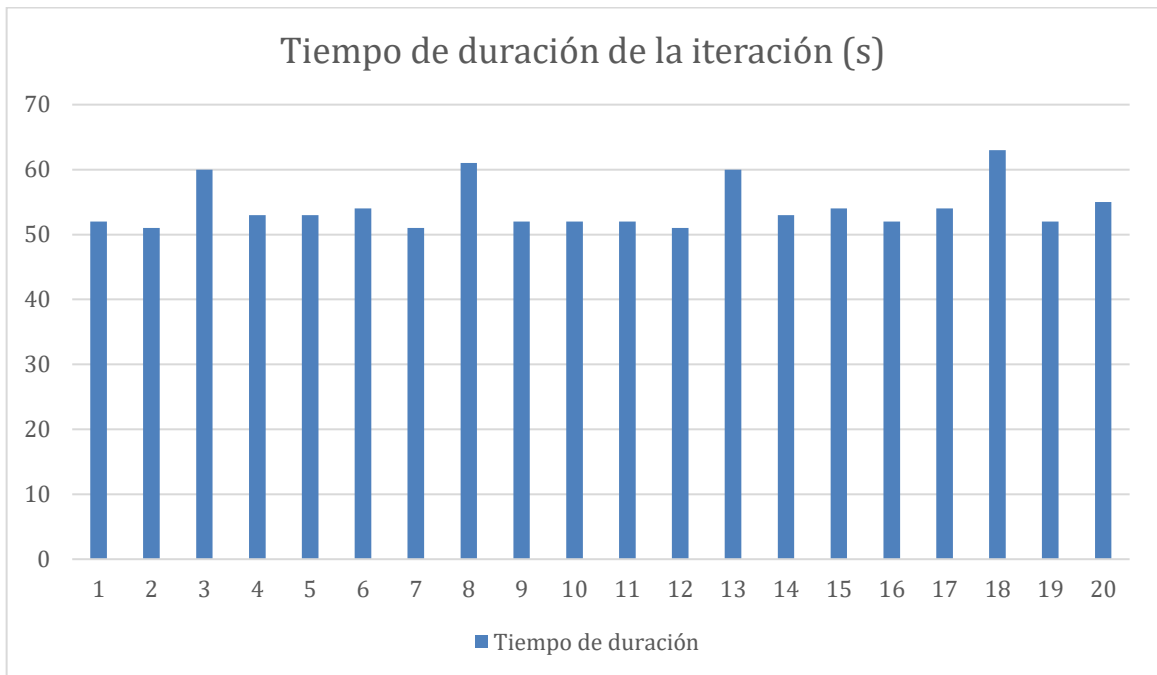


### 5.2.3. Duración de las iteraciones

Siguiendo la misma técnica que en el caso de LoRa, las iteraciones utilizadas para medir el nivel de señal han tenido las siguientes duraciones:

<b>Iteración</b>	<b>Tiempo de duración de la iteración (s)</b>
1	52
2	51
3	60
4	53
5	53
6	54
7	51
8	61
9	52
10	52
11	52
12	51
13	60
14	53
15	54
16	52
17	54
18	63
19	52
20	55

Trasladándolo a un gráfico, obtenemos:



La duración de este tiempo comprende, al igual que en LoRa, el encendido del dispositivo (que despierta del periodo de hibernación), la activación de las comunicaciones con los sensores, la activación del módulo y el envío del mensaje a la estación base receptora.

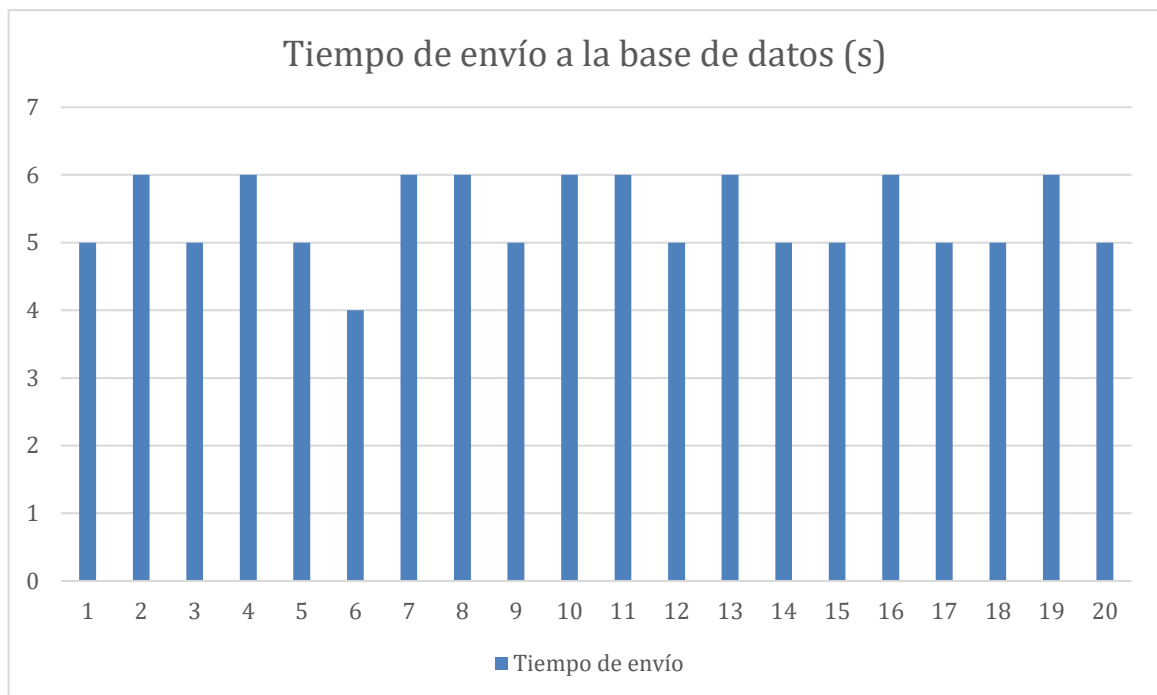
En comparación con lo obtenido en el escenario de comunicación LoRa, los tiempos de las iteraciones disminuyen. Esto se debe a que no es necesario recibir un ACK por parte de la estación base que recibe el mensaje. Por tanto, los resultados obtenidos entran dentro de lo esperado.

#### 5.2.4. Tiempo de envío a la base de datos

Los tiempos obtenidos en esta prueba se recogen en la siguiente tabla:

Iteración	Tiempo de envío a la base de datos (s)
1	5
2	6
3	5
4	6
5	5
6	4
7	6

8	6
9	5
10	6
11	6
12	5
13	6
14	5
15	5
16	6
17	5
18	5
19	6
20	5

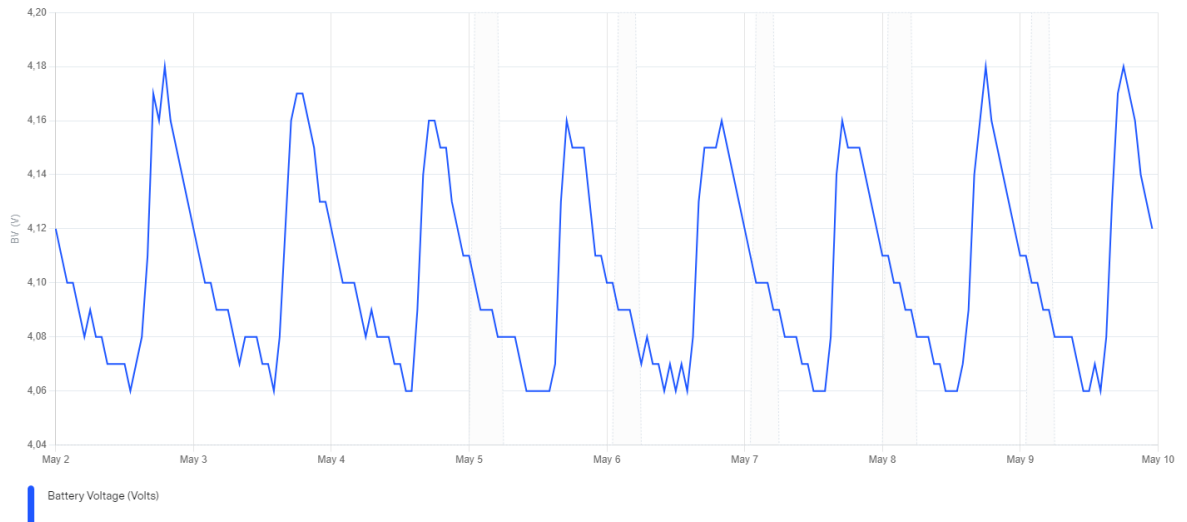


De la misma manera que en LoRa, obtenemos unos tiempos de envío a la base de datos de los paquetes de datos muy similares, ya que el camino que siguen dichos paquetes por las redes GPRS y IP hasta llegar a la base de datos es el mismo.

Estableciendo una comparación con el escenario LoRa, los tiempos disminuyen. Esto no se debe al uso de una tecnología u otra, si no que depende del enrutado de la red GPRS y de la red IP por el que se envía el mensaje. Es decir, el tiempo de envío a la base de datos desde la estación base receptora (o de la pasarela LoRa, en el otro caso) dependerá del enrutado, que a su vez depende del proveedor de servicio GPRS e internet contratado.

### 5.2.5. Duración de la batería

Al igual que ocurre en el caso de LoRa, la siguiente gráfica representa la evolución de la batería del dispositivo en el tiempo en el que se recogieron los datos para la primera prueba:



*Figura 26. Ciclo de carga de la batería en el escenario GPRS.*

En este caso, se vuelve a cumplir el hecho de que el modo de bajo consumo reduce el consumo de batería por parte del dispositivo. Del mismo modo, el uso del panel solar ayuda a que la batería se mantenga cargada durante las horas en las que no hay luz, ayudando esto a no tener que cambiar la batería cada vez que se agota.



## 6. Conclusiones

El análisis de los resultados obtenidos en el capítulo anterior tras la realización de las pruebas descritas a lo largo del trabajo muestra que ambos sistemas de comunicación son totalmente útiles en el campo al que se destina.

Como se comentó en el inicio, la motivación del trabajo era la de mostrar una comparación de dos sistemas que se utilizan hoy día en el campo de la agricultura para la monitorización de los cultivos. Esto se debe a que la tecnología ha irrumpido desde hace unos años en todos los aspectos de la sociedad y es necesario avanzar en todos los ámbitos, adaptándola para obtener mejoras en todos los sentidos.

Esta comparación se ha hecho en distintos aspectos de dichos sistemas. Por ejemplo, se ha comparado las partes necesarias en cada sistema para conseguir una comunicación efectiva y que se consiga obtener los datos necesarios para monitorizar la superficie deseada por parte del cliente. Del mismo modo, se ha realizado una comparación en cuanto a tiempos de envío de estos datos a la base de datos, nivel de señal necesarios para hacer la entrega de los datos de forma correcta o cómo se comporta el modo de bajo consumo de este tipo de sistemas atendiendo al gasto de batería por parte de los dispositivos que conforman los sistemas.

En cuanto a los resultados obtenidos, estos han sido los esperados para cada uno de los sistemas descritos. En ambos casos se ha comprobado el correcto funcionamiento del sistema, lo cual era esperado por la anterior utilización de los dispositivos en mi ámbito laboral.

Por una parte, en cuanto a nivel de señal los resultados muestran que, en el caso de la tecnología LoRa conforme el dispositivo transmisor (denominado en el escenario como dispositivo final) se aleja del dispositivo receptor (denominado pasarela LoRa) y no hay línea de visión directa entre ambos, este nivel aumenta y empeora. En el caso de la tecnología GPRS este nivel cambia y empeora, atendiendo a los resultados, debido a que se establece comunicación móvil con la estación base más cercana al dispositivo transmisor. Por tanto, en este caso, dependerá de la localización del dispositivo.

Por otra parte, en cuanto al tiempo de envío de la base de datos, la comparación entre ambos sistemas radica el entramado de las redes que tiene que atravesar el mensaje con los datos hasta ser recolectados. Por tanto, dependerá del proveedor de internet y/o del proveedor de datos GPRS que se contrate para la transmisión.

Por último, las pruebas de la duración de las iteraciones se pueden tomar como referencia para comprender cómo se gasta la batería de los dispositivos. Si bien es cierto que, gracias al uso del modo de bajo consumo, no hay un enorme gasto de batería, se puede observar la diferencia de unas centésimas de voltaje entre ambos sistemas. Esto puede deberse en el tiempo que está encendido los dispositivos en cada iteración y en que, al tener peor nivel de señal, el módulo de comunicación necesita más potencia para transmitir el mensaje correctamente.

Dicho todo esto, considero que los objetivos planteados en los primeros puntos de este trabajo se han alcanzado, ya que, con los recursos disponibles, se ha mostrado las diferencias de dos sistemas mediante las pruebas realizadas. Con este trabajo se ha querido dar una visión de todas las posibilidades existentes en la actualidad para el uso de sistemas IoT en entornos agrícolas, seleccionando así dos tecnologías que han resultado favorables para su finalidad.

Como puntualización, atendiendo a los distintos escenarios mostrados en el capítulo 4 de esta memoria, se puede establecer una distinción en cuanto a la implantación de una u otra tecnología de comunicación. Por una parte, el caso del sistema LoRa considero que sería más adecuado utilizarlo en instalaciones donde la red móvil no garantice la entrega de los datos, dado un muy bajo nivel de señal o que la localización no esté cubierta por estaciones base transeptoras. En ese caso, LoRa ofrecería la posibilidad de implantar este sistema, aunque sería necesario la colocación de una pasarela LoRa en las instalaciones, teniendo que disponer de conexión a internet in situ para la transferencia de los datos a la base de datos mediante la red IP. Por otra parte, y teniendo en cuenta lo último que se ha comentado, el caso de usar la tecnología GPRS radica en no poder disponer de una conexión a internet en los alrededores de la instalación de los dispositivos finales.

En cuanto al seguimiento de la planificación, considero que se ha seguido tal cual se describió en el primer capítulo de la memoria. Se ha conseguido completar todos los puntos desarrollados para la consecución del trabajo de manera que no ha sido necesario aumentar temporalmente ninguna de las tareas asignadas.

La metodología prevista, por tanto, ha sido la adecuada. Al principio se desarrolló una metodología basada en la búsqueda bibliográfica del concepto del IoT, que ha servido para desarrollar tanto el estado del arte del trabajo como para ampliar el concepto en un tercer capítulo, con la finalidad de profundizar en el paradigma que rodea al IoT. Tras esta búsqueda, el siguiente paso fue describir los sistemas y realizar las pruebas en ambos escenarios, lo cual se ha desarrollado en los capítulos 4 y 5 de esta memoria. Por tanto, la metodología seguida ha servido para completar todo el trabajo que se propuso en un inicio.

Pasando a los impactos previstos en el campo de la sostenibilidad, comentados en el punto 1.3 de la memoria, cabe destacar que han sido positivos.

En el caso de la ODS 9, el presente trabajo ha demostrado como el uso del IoT en entornos agrícolas supone la inclusión de las nuevas tecnologías en este ámbito ayuda a que la industrialización que se lleve a cabo sea sostenible e inclusiva. Del mismo modo, se puede observar cierto alineamiento con la ODS 13, ya que, a la vista de los resultados de las pruebas de batería realizadas, el modo de bajo consumo hace que la degradación de las baterías no se produzca en gran medida, ayudando así a la acción climática.

## 7. Líneas futuras

Por último, tras haber presentado las conclusiones obtenidas al haber realizado las pruebas descritas a lo largo del trabajo, en este capítulo se presentan las posibles líneas futuras del mismo.

Una de estas puede ser la realización de más pruebas para comprobar y añadir más funcionalidades a los sistemas. Por ejemplo, se podrían realizar pruebas con más dispositivos finales, para comprobar cómo se comportan los dispositivos LoRa con el envío en distintas balizas, es decir, en distintos intervalos de tiempo. Con esto, podría estudiarse el caso de colisión por querer enviar un dispositivo el mensaje de datos al mismo tiempo que otro dispositivo de la red. Otra prueba por realizar podría ser el estudio de degradación de la batería, que iba a realizarse en el presente trabajo, pero no se ha podido por diversas circunstancias.

Por otra parte, otra posible línea futura podría ser incluir más sistemas a la comparación, es decir, a partir de las tecnologías mencionadas en el capítulo 3, se tendría que diseñar el sistema de comunicación para otras tecnologías y realizar las pruebas para la correspondiente comparación. De todas las tecnologías comentadas, las que considero más relevantes para su estudio, en el caso de sistemas IoT, son el NB-IoT, Bluetooth, WiFi o SigFox.

Por último, otra posibilidad de línea futura, muy ligada a la actualidad respecto a la acción contra el cambio climático, es la utilización de sensores de medición del caudal, conocidos como caudalímetros. Con esto, se permitiría parametrizar el caudal de agua necesario para el cultivo o superficie agrícola que se esté monitorizando. Esto posibilitaría reducir el gasto innecesario de agua, pudiendo hacer frente a los periodos de sequía que se están dando con mayor frecuencia últimamente en nuestro país.

## 8. Glosario

IoT	Internet de las Cosas ( <i>Internet of Things</i> )
GPRS	Servicio general de paquetes vía radio ( <i>General Packet Radio Service</i> )
LoRa	Largo alcance ( <i>Long Range</i> )
LPWAN	Redes de bajo potencia y área amplia ( <i>Low Power Wide Area Networks</i> )
GSM	Sistema global para las comunicaciones móviles ( <i>Global System for Mobile Communication</i> )
UMTS	Sistema universal de Telecomunicaciones Móviles ( <i>Universal Mobile Telecommunications System</i> )
EPC	Código electrónico del producto ( <i>Electronic Product Code</i> )
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos ( <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> )
IETF	Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet ( <i>Internet Engineering Task Force</i> )
ETSI	Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones ( <i>European Telecommunications Standards Institute</i> )
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones ( <i>International Telecommunications Institute</i> )
CoAP	<i>Constrained Application Protocol</i>
HTTP	Protocolo de Transferencia de Hipertexto ( <i>Hypertext Transfer Protocol</i> )
REST	<i>REpresentational State Transfer</i>
UDP	Protocolo de Datagramas de Usuario ( <i>User Datagram Protocol</i> )
MQTT	<i>Messaging Queue Telemetry Protocol</i>
M2M	Máquina a máquina ( <i>Machine to Machine</i> )
TCP	Protocolo de Control de Transmisión ( <i>Transmission Control Protocol</i> )
XMPP	<i>Extensible Messaging and Presence Protocol</i>
DDS	Servicios de Distribución de Datos ( <i>Data Distribution Service</i> )
mDNS	Sistema de Nombres de Dominio en Multidifusión ( <i>Multicast Domain Name System</i> )
DNS-SD	Sistema de Nombres de Dominio para Descubrimiento de Servicios ( <i>Domain Name System Service Discovery</i> )
RPL	Enrutamiento para redes LLN ( <i>Routing Protocol for LLNs</i> )
LLN	Red de baja potencia y pérdidas ( <i>Low-Power and Lossy Network</i> )

6LoPWAN	IPv6 sobre Redes Inalámbricas de Área Personal ( <i>IPv6 Low-power Wireless Personal Area Networks</i> )
LTE	Evolución a Largo Plazo ( <i>Long Time Evolution</i> )
LTE-A	Evolución a Largo Plazo Avanzada ( <i>Long Time Evolution – Advanced</i> )
H2H	Persona a persona ( <i>Human to human</i> )
LR-WPAN	Red Inalámbrica de Área Personal de Baja Velocidad ( <i>Low-Rate Wireless Personal Area Networks</i> )
WSN	Red Inalámbrica de Sensores ( <i>Wireless Sensors Network</i> )
QoS	Calidad de Servicio ( <i>Quality of Service</i> )
TLS	Seguridad en la Capa de Transporte ( <i>Transport Layer Security</i> )
DTLS	Seguridad en la Capa de Transporte de Datagramas ( <i>Datagram Transport Layer Security</i> )
MAC	Control de Acceso al Medio ( <i>Media Access Control</i> )
uCode	Código de ubicuidad ( <i>Ubiquitous Code</i> )
RFID	Identificación por Radiofrecuencia ( <i>Radio Frequency Identification</i> )
NFC	Comunicación de Campo Cercano ( <i>Near Field Communication</i> )
UWB	Banda ultra ancha ( <i>Ultra-Wideband</i> )
SOC	Sistema en un chip ( <i>System On Chip</i> )
FPGA	Circuito Integrado Digital Programable ( <i>Field Programmable Gate Array</i> )
RTOS	Sistema Operativo en Tiempo Real ( <i>Real Time Operative System</i> )
RFD	Marco de Descripción de Recursos ( <i>Resource Description Framework</i> )
OWL	Lenguaje de Ontología Web ( <i>Web Ontology Language</i> )
EXI	Intercambio XML eficiente ( <i>Efficient XML Interchange</i> )
XML	Lenguaje de Marcado Extensible ( <i>Extensible Markup Language</i> )
OWC	Comunicaciones Ópticas Inalámbricas ( <i>Optical Wireless Communications</i> )
3GPP	Proyecto Asociación de Tercera Generación ( <i>Third Generation Partnership Project</i> )
4G	Cuarta Generación de tecnologías de telefonía móvil
5G	Quinta Generación de tecnologías de telefonía móvil
SINR	Relación del nivel de señal al nivel de ruido ( <i>Signal Interference to Noise Ratio</i> )
UL	Enlace ascendente ( <i>Uplink</i> )
DL	Enlace descendente ( <i>Downlink</i> )

OFDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)
SC-FDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única (Single Carrier – Frequency Division Multiple Access)
QAM	Modulación de Amplitud en Cuadratura (Quadrature Amplitude Modulation)
DBPSK	Modulación de Desplazamiento de Fase de dos Símbolos Diferencial (Differential Binary Phase-Shift Keying)
GFSK	Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Gausiana (Gaussian Frequency Shift Keying)
WLAN	Red Inalámbrica de Área Local (Wireless Local Area Network)
DSSS	Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (Direct Sequence Spread Spectrum)
CSMA/CA	Acceso Múltiple por Detección de Portadora y Prevención de Colisiones (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)
BLE	Bluetooth de Baja Energía (Bluetooth Low Energy)
ACK	Acuse de recibo ( <i>Acknowledgement</i> )
BTS	Estación transceptora base (Base Transceiver Station)
BSC	Controlador de estación base (Base Station Controller)
SGSN	Nodo de soporte de servicio GPRS (Serving GPRS Support Node)
GGSN	Nodo de Soporte de Pasarela GPRS (Gateway GPRS Support Node)
GTP	Protocolo de tunelización de GPRS (GPRS Tunnelling Protocol)
APN	Nombre de Punto de Acceso (Access Point Name)
PDP	Protocolo de Paquetes de Datos (Packet Data Protocol)
HLR	Registro de localización de abonados (Home Location Register)

## 9. Anexos

### 9.1. Anexo 1: Comparativa de protocolos de la capa de aplicación [22]

Protocolo de capa de aplicación	Protocolo de transporte	QoS	Modelo de arquitectura	Protocolo de seguridad
MQTT	TCP	Sí	Publicación/Suscripción	TLS/SSL
CoAP	UDP	Sí	Petición/Respuesta	DTLS
AMQP	TCP	Sí	Publicación/Suscripción	TLS/SSL
XMPP	TCP	No	Publicación/Suscripción Petición/Respuesta	TLS/SSL
DSS	TCP/UDP	Sí	Publicación/Suscripción	SSL/DTLS

### 9.2. Anexo 2: Comparativa de protocolos de infraestructura [23]

Protocolo de capa de infraestructura	Técnica de difusión	Banda de radio (MHz)	Técnica de acceso al medio	Tasa de bits	Nº máximo de nodos
ZigBee	DSSS	868 915 2450	TDMA CSMA/CA	20/40/ 250 k	≅ 65000
Bluetooth	FHSS	2400	TDMA	1024k	5917
LTE/LTE-A	Multiportadora	800 1800 2600	OFDMA	DL 3G UL 1.5G	-
5G	MIMO	3.4-3.8	-	+500M	Gran escala



### 9.3. Anexo 3: Comparativa de tecnologías de largo alcance [10]

	<b>LoRa</b>	<b>SigFox</b>	<b>LTE-M</b>	<b>NB-IoT</b>
Protocolo de acceso al medio	ALOHA / ALOHA ranurado	ALOHA	ALOHA	ALOHA ranurado
Modulación	CSS	GFSK / DBPSK	QPSK/QAM	BPSK / QPSK
Frecuencia	Bandas ISM sin licencia	Bandas ISM sin licencia	Bandas LTE con licencia	Bandas LTE con licencia
Ancho de banda	125/250 kHz	100 Hz	1.4 MHz	200 kHz
Direccionamiento	Semidúplex	Semidúplex	Dúplex/Semi	Semidúplex
Tasa máxima de datos	50 kbps	100 bps	1 Mbps	250 kbps
Tamaño máximo de carga	243 bytes	12 bytes	1000 bits	1000 bits
Cobertura	5-20 kms	10-50 km	Pocos kms	1-10 km
Inmunidad a interferencia	Baja	Muy baja	Baja	Baja
Vida de baterías	10 años	10 años	10 años	10 años
Movilidad	Sí	No	Sí	Sí

### 9.4. Anexo 4: Comparativa de tecnologías de corto alcance [10]

	<b>WiFi</b>	<b>ZigBee</b>	<b>Bluetooth</b>
Protocolo de acceso al medio	CSMA / CA	CSMA / CA	TDMA
Modulación	BPSK / QPSK / QAM	BPSK / OQPSK	GFSK / DQPSK / DPSK
Tasa máxima de datos	7 Gbps	250 kbps	Hasta 3 Mbps
Cobertura	100-1000* m	100 m	100-240* m
Nº de dispositivos	255	255	Más de 1000 en redes malladas

## 9.5. Anexo 5: Parámetros básicos del protocolo ModBus [21]

Parámetro	Especificación
Bits de datos	8 bits
Bit de paridad	No
Bit de parada	1 bit
Corrección de errores	CRC
Tasa de baudios	2400 / 4800 / 9600 bps

## 9.6. Anexo 6: Características del sensor MEC10 [20]

Parámetro	Especificación
Voltaje necesario	3.6-30V DC
Protocolo de comunicación	RS485 ModBus
Disipación en reposo	6 mA (24V DC)
Rango de humedad	0-50% ó 50-100%
Resolución de humedad	0.03 % (0-50%) 1% (50-100%)
Precisión de humedad	3% (0-50%) 5% (50-100%)
Rango de temperatura	- 40 °C ~ 80 °C
Precisión de temperatura	± 0.5 °C
Resolución de temperatura	0.1 °C
Rango de conductividad	0-10000µS/cm ó 10000-20000µS/cm
Resolución de conductividad	10 µS/cm (0-10000µS/cm) 50 µS/cm (10000-20000µS/cm)
Precisión de conductividad	±3% (0-10000µS/cm) ±5% (10000-20000µS/cm)
Nivel de protección	IP68

## 9.7. Anexo 7: Características del sensor de temperatura y humedad [21]

Parámetro	Especificación
Voltaje necesario	12-24V DC
Protocolo de comunicación	RS485 ModBus
Rango de temperatura	-40 °C ~ 80 °C
Precisión de temperatura	± 0.5 °C
Precisión de humedad	±3% (0-53% RH) ±5% (53-100% RH)
Tiempo de respuesta	< 1s
Consumo de potencia	≤0.15 W (12V DC, 25 °C)
Nivel de protección	IP68
Presión de trabajo	0.9-1.1 atm

## 10. Bibliografía

- [1] Villar Miguelez, C., Monzon Baeza, V., Parada, R., & Monzo, C. (2023). Guidelines for Renewal and Securitization of a Critical Infrastructure Based on IoT Networks. *Smart Cities*, 6(2), 728-743.
- [2] Baeza, V. M., & Marban, M. A. (2023). High Altitude Platform Stations Aided Cloud-Computing Solution for Rural-Environment IoT Applications. *Computer Networks and Communications*, 1(1), 91-104.
- [3] Álvarez Marbán, M. (2022). Sistema de agricultura inteligente para Smart Rural basado en tecnología emergente.
- [4] Tarazona Lizarraga, C. (2020). Análisis de las necesidades de una Smart City en el marco de un desarrollo sostenible.
- [5] Vermesan, Ovidiu & Friess, Peter & Guillemin, Patrick & Gusmeroli, Sergio & Sundmaeker, Harald & Bassi, Alessandro & Jubert, Ignacio & Mazura, Margaretha & Harrison, Mark & Eisenhauer, Markus & Doody, Pat. (2009). Internet of Things Strategic Research Roadmap.
- [6] Mehta, Sahni, J., & Khanna, K. (2018). Internet of Things: Vision, Applications and Challenges. *Procedia Computer Science*, 132, 1263–1269.  
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.05.042>
- [7] Singh, Payal, A., & Bharti, S. (2019). A walkthrough of the emerging IoT paradigm: Visualizing inside functionalities, key features, and open issues. *Journal of Network and Computer Applications*, 143, 111–151. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.06.013>
- [8] Miao Wu, Ting-Jie Lu, Fei-Yang Ling, Jing Sun, & Hui-Ying Du. (2010). Research on the architecture of Internet of Things. *2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE)*, 5, V5–484–V5–487.  
<https://doi.org/10.1109/ICACTE.2010.5579493>
- [9] Al-Fuqaha, Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 17(4), 2347–2376.  
<https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>
- [10] Ding, Nemati, M., Ranaweera, C., & Choi, J. (2020). IoT Connectivity Technologies and Applications: A Survey. *IEEE Access*, 8, 1–1.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2985932>

- [11] Chaudhari, Zennaro, M., & Borkar, S. (2020). LPWAN Technologies: Emerging Application Characteristics, Requirements, and Design Considerations. *Future Internet*, 12(3), 46–. <https://doi.org/10.3390/fi12030046>
- [12] Queraltà, Gia, T. N., Zou, Z., Tenhunen, H., & Westerlund, T. (2019). Comparative Study of LPWAN Technologies on Unlicensed Bands for M2M Communication in the IoT: beyond LoRa and LoRaWAN. *Procedia Computer Science*, 155, 343–350. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.049>
- [13] Sauter. (2021). *From GSM to LTE-Advanced Pro And 5G: an introduction to mobile networks and mobile broadband / Martin Sauter. (Fourth edition.)*. Wiley.
- [14] Qadir, Rashid, T. A., Al-Salihi, N. K., Ismael, B., Kist, A. A., & Zhang, Z. (2018). Low Power Wide Area Networks: A Survey of Enabling Technologies, Applications and Interoperability Needs. *IEEE Access*, 6, 77454–77473. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2883151>
- [15] Farahani. (2011). *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8393-7.X0001-5>
- [16] Augustin, Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. M. (2016). A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 16(9), 1466–1466. <https://doi.org/10.3390/s16091466>
- [17] Baeza, V. M., & Armada, A. G. (2021, December). User Grouping for Non-Coherent DPSK Massive SIMO with Heterogeneous Propagation Conditions. In *2021 Global Congress on Electrical Engineering (GC-ElecEng)* (pp. 26-30). IEEE.
- [18] Baeza, V. M., & Armada, A. G. (2021, June). Orthogonal versus Non-Orthogonal multiplexing in Non-Coherent Massive MIMO Systems based on DPSK. In *2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)* (pp. 101-105). IEEE.
- [19] [https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios/12\\_2/12\\_2y/12\\_2yy/ggsn31/31cfg/ggsn31\\_c/ggsnover.html](https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios/12_2/12_2y/12_2yy/ggsn31/31cfg/ggsn31_c/ggsnover.html)
- [20] <https://elty.pl/pl/p/file/0c8fa91d9c96d8ba2a9711ae3ccfbb86/20170718114523993.pdf>
- [21] <https://sourcewell.in/wp-content/uploads/2022/08/RS485-Soil-Temperature-and-Humidity-Sensor-JX-Instruction-Manual.pdf>

[22] Makkad Asim. (2017). A Survey on Application Layer Protocols for Internet of Things (IoT). *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 8(3).

[23] Singh, Payal, A., & Bharti, S. (2019). A walkthrough of the emerging IoT paradigm: Visualizing inside functionalities, key features, and open issues. *Journal of Network and Computer Applications*, 143, 111–151. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.06.013>