

TESIS DOCTORAL del Programa de Doctorado en Ingeniería Mecatrónica

CONTRIBUCIONES AL DESARROLLO DE SISTEMAS DE SENSORES BASADOS EN REDES INALÁMBRICAS PARA APLICACIONES CON ROBOTS Y SISTEMAS AUTÓNOMOS

CARLOS ALBERTO SOCARRAS BERTIZ



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

Directores: Dr. José Antonio Gómez Ruiz
Dr. Juan Jesús Fernández Lozano
Tutor: Dr. José Antonio Gómez Ruiz

Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Málaga 2022



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

AUTOR: Carlos Alberto Socarras Bertiz

 <https://orcid.org/0000-0002-3801-6943>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización
pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): riuma.uma.es





DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR

D./Dña CARLOS ALBERTO SOCARRAS BERTIZ

Estudiante del programa de doctorado EN INGENIERÍA MECATRÓNICA de la Universidad de Málaga, autor/a de la tesis, presentada para la obtención del título de doctor por la Universidad de Málaga, titulada: **CONTRIBUCIONES AL DESARROLLO DE SISTEMAS DE SENSORES BASADOS EN REDES INALÁMBRICAS PARA APLICACIONES CON ROBOTS Y SISTEMAS AUTÓNOMOS**

Realizada bajo la tutorización de JOSÉ ANT. GÓMEZ RUIZ y dirección de JOSÉ ANT. GÓMEZ RUIZ Y J. JESÚS FERNÁNDEZ LOZANO (si tuviera varios directores deberá hacer constar el nombre de todos)

DECLARO QUE:

La tesis presentada es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, conforme al ordenamiento jurídico vigente (Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo.

Igualmente asumo, ante a la Universidad de Málaga y ante cualquier otra instancia, la responsabilidad que pudiera derivarse en caso de plagio de contenidos en la tesis presentada, conforme al ordenamiento jurídico vigente.

En Málaga, a 3 de Octubre de 2022

<p>Doctorando/a</p>	<p>Fdo.: JOSÉ ANTONIO GÓMEZ RUIZ Tutor/a</p>
<p>Fdo. Directores: JOSÉ ANTONIO GÓMEZ RUIZ J. JESÚS FERNÁNDEZ LOZANO</p>	



UNIVERSIDAD
DE MALAGA

En honor a mi madre Ramona Elena y en memoria de padre Luis Alberto.
A mi esposa Karen y mis hijos Karla, Karlos y Kylian.



UNIVERSIDAD
DE MALAGA

Agradecimientos.

En el desarrollo de esta tesis doctoral han sido muchas las personas que han aportado para su consolidación, por eso hoy quiero agradecerles por los aportes realizados.

En primer lugar, agradecerle a Dios por darme la oportunidad, sabiduría y la fuerza para sacar adelante mis estudios, por darme vida, salud, y por protegerme en todo momento.

Quiero hacer un reconocimiento muy especial a mis directores de tesis Juan Jesús Fernández Lozano y José Antonio Gómez Ruiz, quienes han sido una guía constante para el desarrollo de esta tesis. Por sus orientaciones y paciencia en todo este proceso. Para ellos infinitas gracias.

Gracias también, al apoyo técnico del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, y la financiación de esta tesis.

Quiero agradecer además a la Universidad de la Guajira que me permitió cursar este doctorado con su apoyo y financiación de mis estudios.

A mis padres, Ramona Bertiz y Luis Alberto Socarras (Q.E.P.D), por ser mis guías y mis amigos incondicionales, brindándome su apoyo sincero en todo momento, encaminándome por los mejores senderos.

A mi esposa, Karen García y a mis hijos, Karla Michelle, Karlos A. Junior y Kylian Alberto, a los que les he quitado tanto tiempo, he aquí el resultado de este esfuerzo realizado.

En fin, a todas aquellas personas que estuvieron presentes para darme apoyo y con las cuales compartí muchas alegrías.

Gracias por que hoy son merecedores de mi reconocimiento.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Abstract

Wireless sensor networks facilitate the obtention of quantitative information from phenomena with persistence in time, in a large geographic area, or in both cases. However, covering a wide area usually requires deploying a large number of network nodes. In mobile robotics applications, it is desirable to have as much information about the environment as possible. Sensor networks can be a valuable asset, but the very mobile nature of robots requires a very extensive network of nodes.

This thesis focuses on contributing to the development of wireless sensor networks that improve the ability to have environmental information in a large area, with the purpose of moving towards integration with robots and autonomous systems.

The main wireless network technologies are presented, focusing on the ZigBee protocol for short-range networks and LoRa for long-range ones.

The development and implementation of a mobile node is proposed, which has been mounted on board an electric vehicle to carry out the experiments in the urban environment of the city of Malaga. The use of a mobile node, which can be configured with different sensors according to needs, makes it possible to expand the reach in short-range networks, and check the coverage of static hubs, deployed in areas of interest, in long-range networks.

The mobile node enables the implementation of a ZigBee-based hybrid wireless sensor network, which is capable of collecting environmental information over a wide geographic area without the need for multi-hop routing or dynamic relocation methods, resulting in improved range and flexibility compared to a static network, even if it is based on long-range technology like LoRa.

Keywords: wireless sensor networks, mobile nodes, hybrid wireless sensor networks, cyber-physical systems.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Resumen

Las redes de sensores inalámbricas facilitan la obtención de información cuantitativa de algún fenómeno con persistencia en el tiempo, en un área geográfica extensa, o en ambos casos. Sin embargo, cubrir una zona amplia normalmente requiere desplegar un elevado número de nodos de la red. En aplicaciones de robótica móvil, es deseable contar con tanta información del entorno como sea posible. Las redes de sensores pueden ser un elemento valioso, pero la propia naturaleza móvil de los robots obliga a contar con una red de nodos muy extensa.

Esta tesis se centra en contribuir al desarrollo de redes de sensores inalámbricas que mejoren la capacidad de contar con información ambiental en un área extensa, con el propósito de avanzar hacia la integración con robots y sistemas autónomos.

Se hace un recorrido por las principales tecnologías de redes inalámbricas centrándose en el protocolo ZigBee para las redes de corto alcance y LoRa para las de largo alcance.

Se propone el desarrollo e implementación de un nodo móvil, que se ha montado a bordo de un vehículo eléctrico para la realización de los experimentos en el entorno urbano de la ciudad de Málaga. El uso de un nodo móvil, que se puede configurar con diferentes sensores según las necesidades, posibilita ampliar la extensión en redes de corto alcance y comprobar la cobertura de concentradores estáticos, desplegados en zonas de interés, en redes de largo alcance.

El nodo móvil permite la implementación de una red de sensores inalámbrica híbrida basada en ZigBee, que es capaz de recolectar información ambiental en una zona geográfica amplia sin necesidad de enrutamiento de múltiples saltos o métodos de reubicación dinámica, dando como resultado alcance y flexibilidad mejorados con respecto a una red estática, incluso cuando está basada en una tecnología de largo alcance como LoRa.

Palabras claves: red de sensores inalámbricas, nodos móviles, redes de sensores inalámbricas híbridas, sistemas ciberfísicos.



UNIVERSIDAD
DE MALAGA

Tabla de contenido.

Agradecimientos	vii
Abstract	ix
Resumen	xi
Tabla de contenido	xiii
Lista de figuras	xvii
Listado de tablas	xxi
Nomenclatura (siglas)	xxiii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Motivación de la tesis	1
1.2. Contexto de la tesis.	1
1.3. Contribuciones de la tesis.	2
1.4. Estructura de la tesis.	3
Capítulo 2. Redes de sensores inalámbricas.	5
2.1. Introducción.	5
2.2. Características de las redes de sensores inalámbricas.	5
2.2.1. Tipos de redes inalámbricas según su alcance.	6
2.2.2. Estructura de una red de sensores inalámbricos.	7
2.2.3. Elementos de una red de sensores inalámbrica.	11
2.3. Entornos urbanos.	12
2.4. Tecnologías inalámbricas de corto alcance.	13
2.4.1. Protocolo ZigBee.	14
2.4.2. WiFi.	15
2.4.3. Protocolo MiWi	16

2.4.4.	Protocolo EnOcean	17
2.5.	Tecnologías inalámbricas de largo alcance.	18
2.5.1.	WiFi HaLow.	18
2.5.2.	Protocolo LoRa	19
2.5.3.	DigiMesh.	20
2.5.4.	Protocolo SigFox.	21
Capítulo 3. Redes de sensores inalámbricas de corto alcance: ZigBee.		23
3.1.	Introducción.	23
3.2.	Protocolo ZigBee.	24
3.2.1.	Arquitectura del Protocolo ZigBee.	25
3.2.2.	Enrutamiento de paquetes.	26
3.3.	Perfil de red.	29
3.3.1.	Nodo Coordinador ZigBee.	29
3.3.2.	Nodo Router ZigBee.	29
3.3.3.	Nodo final.	30
3.4.	Topologías de red.	30
3.4.1.	Topología en estrella.	31
3.4.2.	Topología en árbol.	32
3.4.3.	Topología en Malla.	32
3.5.	Seguridad de la red.	33
3.5.1.	Checksum.	33
3.5.2.	Algoritmos Estándar de cifrado avanzado AES (Advanced Encryption Standard).	33
3.5.3.	Fase de Encriptación y Autenticación.	34
3.6.	Red estática: arquitectura e implementación.	34

3.6.1.	Arquitectura del sistema	35
3.6.2.	Implementación.	37
3.7.	Nodo móvil.	39
3.7.1.	Estructura general.	39
3.7.2.	Arquitectura e Implementación.	40
3.7.3.	Modo local.	42
3.7.4.	Modo en red.	44
3.7.5.	Integración con la H-WSN	46
Capítulo 4. Redes de sensores inalámbricos de largo alcance: LoRa.		49
4.1.	Introducción.	49
4.2.	Protocolo LoRa.	50
4.2.1.	Arquitectura de una red LoRa.	52
4.2.2.	Estructura de la trama.	53
4.3.	Elementos de Red.	54
4.3.1.	Concentrador.	54
4.3.2.	Nodos finales.	55
4.3.3.	Servidor de red.	56
4.3.4.	Servidor de la aplicación.	56
4.4.	Topología de red.	57
4.5.	Seguridad de la red.	57
4.6.	Arquitectura e implementación.	58
4.6.1.	Arquitectura del sistema.	58
4.6.2.	Implementación.	59
4.6.3.	Nodo Móvil.	62

Capítulo 5. Experimentos.	65
5.1. Introducción.	65
5.2. Experimentos con la red de corto alcance.	66
5.2.1. Modo local.	67
5.2.2. Modo en red.	69
5.3. Experimentos con la red de largo alcance.	72
5.4. Análisis y discusión.	79
Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro.	87
6.1. Conclusiones.	87
6.2. Trabajo futuro.	89
Referencias.	91
Apéndices.	103

Lista de figuras

Figura 2.1 Tipos de redes inalámbricas (adaptada de [11]).	7
Figura 2.2 Topología punto a punto (adaptada de [13])	8
Figura 2.3 Topología estrella (adaptada de [13]).	8
Figura 2.4 Topología en malla (adaptada de [13]).	9
Figura 2.5 Topología en árbol (adaptada de [13]).	10
Figura 2.6 Híbrida estrella-malla (adaptada de [13]).	10
Figura 2.7 Elementos de una red de sensores inalámbrica (adaptada de [19][20]).	12
Figura 3.1. Correspondencia del Modelo OSI con 802.15.4/ZigBee (adaptada de [8]).	25
Figura 3.2. Estructura de la trama (adaptada de [19]).	27
Figura 3.3. Dispositivos de una red ZigBee (adaptada de [77]).	30
Figura 3.4. Topología de la red ZigBee. (adaptada de [79])	31
Figura 3.5. Sistema de encriptación propuesto por Libelium (adaptada de [84]) .	34
Figura 3.6. Arquitectura del sistema de la red de sensores inalámbricos estáticos UIS.	36
Figura 3.7. Diferentes tipos de nodos desarrollados para el Sistema de Información Urbana.	38
Figura 3.8. Arquitectura del nodo móvil.	41
Figura 3.9. Estructura de trama ASCII empleada en el nodo móvil (adaptada de [73]).	42
Figura 3.10. Diagrama de flujo de mensajes de protocolo simplificado para el modo local.	43
Figura 3.11. Parte de una trama mejorada.	43
Figura 3.12. Diagrama de flujo de mensajes de protocolo simplificado para el modo en red.	45

Figura 3.13. Trama en modo de red con datos de dos sensores de gas.	45
Figura 3.14. Trama en modo de red con datos de tres sensores de gas.	45
Figura 3.15. Integración del nodo móvil para crear una red de sensores híbridos-inalámbricos.	46
Figura 3.16. Interfaz hombre-máquina para el sistema de información urbana.	47
Figura 4.1. Protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema de LoRaWAN (adaptado de [103]).	51
Figura 4.2. Arquitectura de una red LoRa (adaptada de [106]).	52
Figura 4.3. Estructura de la trama (adaptada de [107]).	53
Figura 4.4. Relación entre la latencia y la duración de la batería para las diferentes clases de nodos (adaptada de [111]).	56
Figura 4.5 Arquitectura del sistema propuesta.	59
Figura 4.6. Nodo final de control ambiental (adaptada de [44]).	60
Figura 4.7. Nodo entorno inteligente PRO (adaptada de [44]).	61
Figura 4.8. Nodo agricultura inteligente PRO (adaptada de [44]).	61
Figura 5.1 Vehículo utilizado en experimentos. Se muestra el contenedor empleado para portar los elementos del nodo móvil.	67
Figura 5.2. Área del centro de la ciudad cubierta por experimentos en modo local.	68
Figura 5.3 Área de la ciudad de Málaga cubierta por experimentos en modo en red.	71
Figura 5.4 Mediciones para el sensor NH ₃ obtenidas en un experimento en modo de red, como se muestra en la interfaz de usuario.	71
Figura 5.5 Nissan Leaf con los nodos sensores en su baca.	74
Figura 5.6 Puntos escogidos para los nodos concentradores en la ciudad de Málaga.	75
Figura 5.7 Recorrido del vehículo en la ciudad de Málaga.	76
Figura 5.8 Datos recibidos por cada concentrador geolocalizados en la ciudad de Málaga (Google 2019).	78

Figura 5.9 Paquetes de datos recogidos desde el Pabellón de Gobierno En el Ejido (Google 2019). 78

Figura 5.10 Tablas combinadas del experimento urbano. 79



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Listado de tablas

Tabla 2.1 Tipos de redes inalámbricas (adaptada [7][8][9][10]).	6
Tabla 2.2 Alcance de algunas tecnologías inalámbricas de corto alcance.	13
Tabla 2.3. Ventajas y desventajas del uso del protocolo ZigBee (adaptada de [37])	15
Tabla 2.4. Ventajas y desventajas de WiFi (adaptada de [47])	16
Tabla 2.5 Ventajas y desventajas de MiWi (adaptada de [49])	17
Tabla 2.6 Ventajas y desventajas de EnOcean (adaptada de [52])	17
Tabla 2.7 Alcance de algunas tecnologías inalámbricas de largo alcance.	18
Tabla 2.8. Ventajas y desventajas de WiFi HaLow (adaptada de [54])	19
Tabla 2.9. Ventajas y desventajas de LoRa (adaptada de [55])	20
Tabla 2.10. Ventajas y desventajas de DigiMesh (adaptada de [59])	21
Tabla 3.1. Características del estándar ZigBee.	25
Tabla 3.2. Características de las topologías de la red.	31
Tabla 4.1. Características del protocolo LoRa para Europa y América del Norte (adaptada de [102]).	51
Tabla 4.2 Tasa de transferencia con ancho de banda constante para los Spread Factor (adaptada de [119]).	62
Tabla 5.1. Datos obtenidos para una ruta del centro de la ciudad en modo local.	69
Tabla 5.2 Resumen de los datos obtenidos por el nodo Móvil en una ruta en la ciudad de Málaga, trabajando en modo en red.	72
Tabla 5. 3 Resumen de datos obtenidos en la ruta.	77
Tabla 5.4. Comparación de las redes de corto y largo alcance implementadas.	85



UNIVERSIDAD
DE MALAGA

Nomenclatura (siglas).

ABP: Activation By Personalization.

Ack: Acknowledgement.

AES: Advanced Encryption Standard.

AODV: Ad hoc On Demand Distance Vector Routing.

AppSKey: Application Session Key.

CO: Monóxido de carbono.

CO₂: Dióxido de carbono

CRC: Close Range Correction.

CSMA-CA: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance.

DevAddr: Device Address.

EUI: Extended Unique Identifier.

FFD: Full Function Device.

HMI: Human-Machine Interface.

H-WSN: Hybrid Wireless Sensor Network.

ID PAN identificador único de la red.

IoT: Internet of Things.

ISM: Industrial Scientific and Medical.

LoRa: Long Range.

LoRaWAN: Long Range Wide Area Network.

MAC: Media Access Control.

Matriz OD: matriz de origen-destino.

MIC: Message integrity code.

NH₃: Amoniaco.

NwkSKey: Network Session Key.

O₂: Oxígeno.

OSI: Open System Interconnect

OTAA: Over-The-Air Activation.

PHY: Physical Layer.

RF: Radio Frequency.

SF: Spread Factor.

SSH: Secure Shell.

TIC: Tecnologías de la Información y Comunicación.

UIS: Urban Information System.

UMA: Universidad de Málaga.

VOC: Volatile Organic Compounds.

WAPMS: Wireless Sensor Network Air Pollution Monitoring System.

WiFi: Wireless Fidelity.

WiMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access.

WLAN: Wireless Local Area Network.

WMAN: Wireless Metropolitan Area Network.

WN: Wireless network

WPAN: Wireless Personal Area Network.

WSN: Wireless Sensor Network.

WWAN: Wireless Wide Area Network.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Capítulo 1. Introducción.

1.1. Motivación de la tesis.

Las redes de sensores inalámbricas (WSN, Wireless Sensor Networks) facilitan la obtención de información cuantitativa de algún fenómeno con persistencia en el tiempo, en un área geográfica extensa, o en ambos casos. Sin embargo, cubrir una zona amplia normalmente requiere desplegar un elevado número de nodos de la red. En aplicaciones de robótica móvil, es deseable contar con tanta información del entorno como sea posible. Las redes de sensores pueden ser un elemento valioso, pero la propia naturaleza móvil de los robots obliga a contar con una red de nodos muy extensa.

Esta tesis se centra en contribuir al desarrollo de redes de sensores inalámbricas que mejoren la capacidad de contar con información ambiental en un área extensa, con el propósito de avanzar hacia la integración con robots y sistemas autónomos.

1.2. Contexto de la tesis.

Esta tesis se enmarca dentro de los trabajos realizados en los proyectos de investigación:

- Sistema multi-robot para cooperación con equipos de rescate de primera respuesta humanos y caninos en escenarios de catástrofes. Entidad financiadora: Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, Programa Estatal de I+D+i 2018. Referencia: DPI2015-65186-R. Investigadores principales: Alfonso José García Cerezo y Antonio Mandow Andaluz. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Málaga. Inicio-fin: enero 2016 - diciembre 2018.
- TRUST-ROB: Towards Resilient UGV and UAV Manipulator Teams for Robotic Search and Rescue Tasks. Entidad financiadora: Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, Programa Estatal de I+D+i 2018. Referencia: RTI2018-093421-B-I00. Investigadores principales: Alfonso José García Cerezo y Antonio Mandow

Andaluz. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Málaga. Inicio-fin: enero 2019 - diciembre 2022.

Así mismo, el autor ha realizado estancias en la Universidad de Málaga financiadas por la Universidad de la Guajira a través del contrato de comisión de estudios 001 de 2017, con el apoyo del grupo de investigación Ingeniería de procesos automatización, innovación y tecnología de la universidad de la Guajira (IPAITUG), dentro de la línea de investigación de automatización de procesos.

1.3. Contribuciones de la tesis.

La contribución principal de esta tesis es la implementación de una red de sensores inalámbrica híbrida basada en una tecnología de corto alcance como ZigBee, capaz de recolectar información ambiental en una zona geográfica amplia sin necesidad de enrutamiento de múltiples saltos o métodos de reubicación dinámica, dando como resultado alcance y flexibilidad mejorados con respecto a una red estática, incluso cuando está basada en una tecnología de largo alcance como LoRa. Se han realizado experimentos tanto con la red híbrida propuesta como con una red estática basada en LoRa.

Dentro de las contribuciones de esta tesis se han publicado los siguientes trabajos:

- Wireless Sensor Networks for Urban Information Systems: Preliminary Results of Integration of an Electric Vehicle as a Mobile Node. 2018. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol.694, pp. 190-199. DOI: 10.1007/978-3-319-70836-2_16.
- Integration of a Canine Agent in a Wireless Sensor Network for Information Gathering in Search and Rescue Missions. 2018. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'2018)*, pp. 5685-5690. DOI: 10.1109/IROS.2018.8593849.
- Integration of a Mobile Node into a Hybrid Wireless Sensor Network for Urban Environments. 2019. *Sensors*, vol. 19(1), Id. 215. DOI: 10.3390/s19010215.

1.4. Estructura de la tesis.

Esta tesis está organizada en seis capítulos más las referencias bibliográficas.

En el capítulo 1 se presenta la motivación de la tesis, su contexto, las contribuciones realizadas y la estructura de la memoria de investigación.

En el capítulo 2 se presentan los aspectos generales de las redes de sensores inalámbricas, los principales tipos existentes, sus elementos y topologías posibles.

Así mismo, se hace una clasificación de las mismas según su alcance: tecnologías de corto alcance y tecnologías de largo alcance. Finalmente se detallan las características principales de algunas de las tecnologías más usadas dentro de cada clasificación.

En el capítulo 3 se aborda en detalle el protocolo de corto alcance ZigBee, definiendo su arquitectura e implementación. Se plantean además otros aspectos como el perfil de la red, seguridad, el modo de trabajo y la integración de la red en una red híbrida de sensores inalámbricos mediante la implementación de un nodo móvil.

En el capítulo 4 se presenta el protocolo de largo alcance LoRa, definiendo igualmente su arquitectura e implementación, los diferentes modos de funcionamiento y los elementos de seguridad de la red.

En el capítulo 5 se presentan los experimentos realizados con la implementación de ambas redes (de corto y largo alcance) en el entorno urbano de la ciudad de Málaga. Se muestran los resultados obtenidos y se hace un análisis y discusión de los resultados obtenidos con ambas implementaciones.

Finalmente, en el Capítulo 6, se presentan las conclusiones de la tesis y algunas propuestas para trabajos futuros de investigación



UNIVERSIDAD
DE MALAGA

Capítulo 2. Redes de sensores inalámbricas.

2.1. Introducción.

En este capítulo se hace una revisión de las diferentes tecnologías que se usan en las redes de sensores inalámbricas [1] introduciendo sus características, los componentes que la integran [2], configuraciones en diferentes topologías, así como una clasificación de acuerdo a su alcance. Finalmente se describen diferentes protocolos de comunicación que permiten la comunicación entre los dispositivos que la integran una WSN.

2.2. Características de las redes de sensores inalámbricas.

En las redes inalámbricas (*WN, wireless network*) los nodos se conectan sin conexión física [3], comunicándose por ondas electromagnéticas a una determinada frecuencia. Permiten formar redes Ad-hoc donde no hay ningún dispositivo central, estando todos en el mismo nivel jerárquico [4].

Han tenido un auge importante en los últimos años [5] permitiendo la integración de dispositivos como sensores formando lo que se conoce como WSN [4]. Las WSN pueden tener un gran número de nodos sensores permitiendo la adquisición de información principalmente cuando se requiere la proximidad de los sensores al fenómeno y la consistencia en el tiempo [6][7]. Normalmente existe un nodo coordinador que es el que recibe la información del resto de nodos sensores y actúa como interfaz entre los usuarios y la red.

Los nodos sensores tienen la posibilidad de comunicarse entre ellos usando señales de radio. Sus recursos son limitados en capacidad de almacenamiento, ancho de banda y velocidad de

procesamiento, que serán factores de estudio dependiendo de las necesidades de aplicación a problemas concretos.

2.2.1. Tipos de redes inalámbricas según su alcance.

Una clasificación que puede hacerse de las WNs es por su alcance: la red inalámbrica de área personal (*WPAN, Wireless Personal Area Network*), la red inalámbrica de área local (*WLAN, Wireless Local Area Network*), la red inalámbrica de área metropolitana (*WMAN, Wireless Metropolitan Area Network*), y la red inalámbrica de área amplia (*WWAN, Wireless Wide Area Network*).

En la Tabla 2.1, se presentan algunos detalles de estas WN.

Tabla 2.1 Tipos de redes inalámbricas (adaptada [7][8][9][10]).

	WPAN	WLAN	WMAN	WWAN
Estándar	IEEE 802.15	IEEE 802.11	IEEE 802.16	IEEE 802.20
Alcance	10 m	100 m	50 km	Más de 50 km
Consumo energía	Bajo	Bajo	-	-
Velocidad transmisión	Baja	Media	Alta	Alta

En la Figura 2.1 se puede ver un esquema con los tipos de redes inalámbricas de acuerdo a su alcance.

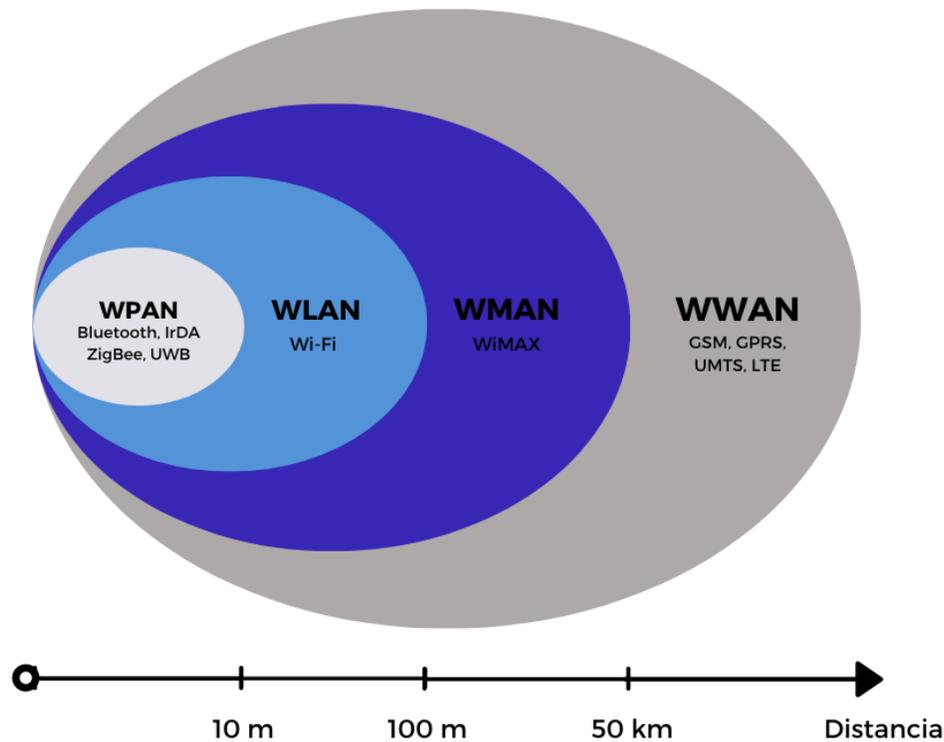


Figura 2.1 Tipos de redes inalámbricas (adaptada de [11]).

Otra clasificación que se puede hacer de las WNs es en redes de corto y largo alcance [12] (ver sección 2.4).

2.2.2. Estructura de una red de sensores inalámbricos.

Las WSNs están formadas por un conjunto de nodos sensores que se pueden configurar en diferentes topologías: en punto a punto, estrella, malla, árbol y la topología híbrida estrella-malla. A continuación, se hace una descripción de estas topologías.

- **Punto a punto.**

En esta topología hay comunicación del nodo con el nodo recolector de datos. Actuando uno como emisor y el otro como receptor [13]. Este es el único que recibe los datos censados. La comunicación se da solo entre esos dos puntos. En la Figura 2.2, se muestra esta topología.



Figura 2.2 Topología punto a punto (adaptada de [13])

- **Estrella.** Cada nodo sensor se conecta directamente al coordinador no pudiendo enviar mensajes entre ellos [14]. Entre las ventajas que aportan está el bajo consumo de energía, la baja latencia entre el nodo sensor y el coordinador, una desventaja es que, si cae el coordinador, cae toda la red, lo que la hace poco robusta, al tener un solo coordinador que administra la red. Otra desventaja es que el coordinador debe estar en el alcance de comunicación de todos los nodos sensores. En la Figura 2.3 se muestra un esquema de esta topología.

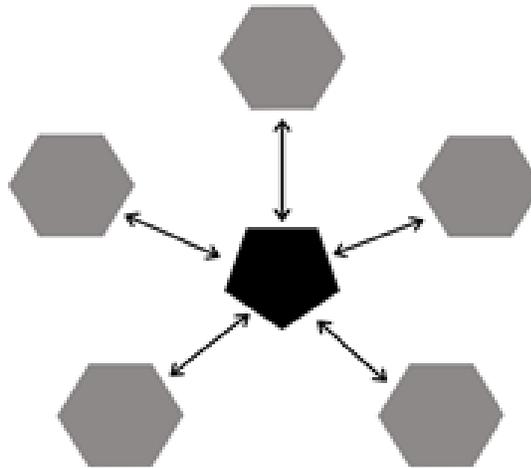


Figura 2.3 Topología estrella (adaptada de [13]).

- **Malla.** Se pueden transmitir datos entre los distintos nodos sensores que estén dentro del alcance de transmisión de radio [14]. Cuando un nodo quiere enviar un mensaje a otro nodo que está fuera del alcance, utiliza un nodo intermedio para enviar el mensaje al nodo determinado. Lo que se conoce como comunicaciones de múltiples saltos. Tiene la ventaja de la redundancia y la escalabilidad, si un nodo individual falla, un nodo remoto puede comunicarse con cualquier otro nodo a su alcance. Además, se puede ampliar el alcance de la red agregando nuevos nodos sensores. Su desventaja es el mayor consumo de energía, limitando la duración de la batería. En la Figura 2.4 se muestra un esquema de esta topología.

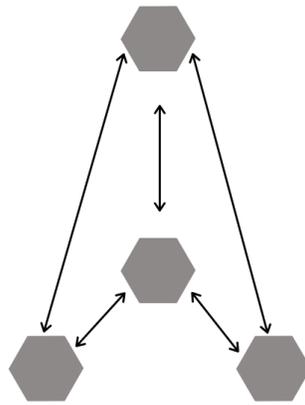


Figura 2.4 Topología en malla (adaptada de [13]).

- **Árbol.**

Es similar a la topología de estrella y se basa directamente en la topología de bus [15]. Un nodo central conecta los nodos de la red, compartiendo el mismo canal de comunicaciones. Cuando un nodo falla, no se presentan problemas con la red en los otros nodos. Se pueden resolver fácilmente los problemas de la red. Sin embargo, si el nodo central falla, toda la red dejaría de funcionar. En la Figura 2.5 se muestra esta topología.

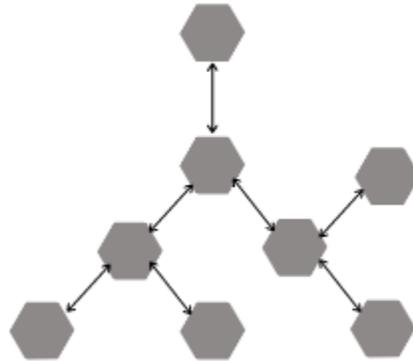


Figura 2.5 Topología en árbol (adaptada de [13]).

- **Híbrida estrella-malla.**

Provee una red de comunicaciones robusta y versátil, combinando la ventaja de los dos tipos de red antes descritos, el bajo consumo de la topología en estrella y una gran cobertura y reorganización cuando se presenten fallos de la topología en malla. A través de los routers se amplía la red y se corrigen los fallos. La conexión de los nodos finales se realiza con los routers más cercanos [16].

En la Figura 2.6 muestra un esquema de esta topología.

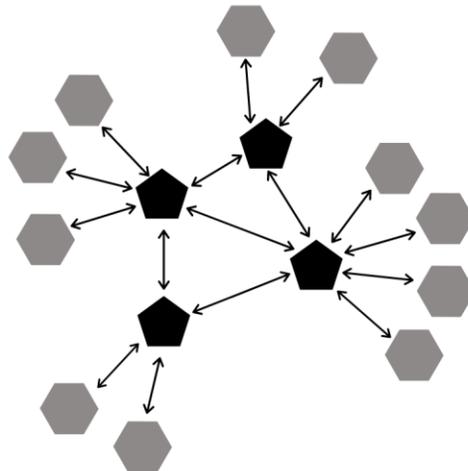


Figura 2.6 Híbrida estrella-malla (adaptada de [13]).

2.2.3. Elementos de una red de sensores inalámbrica.

Una WSN está compuesta por sensores, nodos sensores, puerta de enlace y estación base [15]. La integración de estos elementos permite la comunicación y la gestión de la red para la recolección de la información requerida.

- **Sensor:** Son los dispositivos encargados de recolectar la información del entorno [17].
- **Nodo Sensor:** Son dispositivos electrónicos que toman la información recolectada por el sensor y la envían a la estación base [18].
- **Puerta de enlace.** Es el dispositivo encargado de permitir la interconexión de los elementos de la WSN [17]. Algunas veces es otro nodo sensor.
- **Estación base:** Es el dispositivo que almacena la información recolectada por los sensores [17].

En esta tesis, para la red de corto alcance implementada con ZigBee, se trabaja con un nodo coordinador que se encarga de recibir la información de los nodos sensores y sirve de interfaz entre los usuarios y la red. A los nodos sensores se les denomina nodos transmisores.

Para el caso de la red de largo alcance con LoRa se usa un concentrador que es el encargado de recibir los datos de los nodos sensores, que en esta tesis se les denominan nodos finales.

Para el caso de la estación base en esta tesis, en la red de corto alcance el coordinador tiene una base de datos interna. Esta base de datos se sincroniza con una base de datos externa. En la Figura 2.7 se muestra los elementos en general de una red de sensores inalámbrica.



Figura 2.7 Elementos de una red de sensores inalámbrica (adaptada de [19][20]).

2.3. Entornos urbanos.

De acuerdo a las estadísticas de las naciones unidas, el 55% de la población vive en entornos urbanos y se estima que para el 2050 llegue al 68% [21]. Este alto crecimiento es un desafío para los planificadores urbanos, cuyo propósito es mantener una alta calidad de vida en estos entornos. En la última década [22] han aparecido conceptos como ciudad inteligente y muchas ciudades en Europa, Estados Unidos y Asia comenzaron adoptar algunas iniciativas en esa línea, como el uso de las tecnologías de la información y comunicación (TIC), para ayudar a la gestión urbana [23]. No obstante el desarrollo de las ciudades inteligentes está en etapas preliminares, existiendo desafíos como el desarrollo y la implementación necesarios para la estructura de gobernanza, formación de asociaciones adecuadas entre el sector privado y el gobierno con la integración efectiva de la infraestructura de las TIC [24].

Algunos estudios demostraron que la salud humana y la contaminación del aire urbano están directamente relacionados [25], el monóxido de carbono (CO), por ejemplo causa problemas respiratorios [26]. Esta es una de las razones por las que se requiere disponer de información

ambiental detallada para una efectiva toma de decisiones. Es importante identificar la fuente y reducirla [27] y las WSN son una herramienta adecuada para este objetivo.

Las autoridades gubernamentales generalmente son las que desarrollan el control ambiental [28], necesitando desplegar estaciones medio ambientales, que son costosas, lo que hace que estas fuentes de información sean escasas [29]. Existe, por tanto, una necesidad general de búsqueda de alternativas flexibles y asequibles que permitan implementar estaciones medio ambientales oficiales [28] y para ello es necesario comprender las características de las áreas urbanas, teniendo en cuenta la variabilidad en las emisiones y el potencial de exposición a condiciones potencialmente dañinas [30].

Las WSN han surgido como facetas altamente flexibles y dinámicas [31] y se están implementando en casi todos los tipos de entornos aunque centrados principalmente en urbanas [32].

Por ejemplo, en [33] se propuso un sistema basado en WSN diseñado para caracterizar el tráfico urbano, en [30] desarrollaron una WSN para monitorizar en diferentes escalas temporales y espaciales en [34] propusieron un sistema WNS de monitorización de la polución del aire (WAPMS, *Wireless Sensor Network Air Pollution Monitoring System*). Todas estas propuestas tienen en común el uso de sensores de bajo costo [35].

2.4. Tecnologías inalámbricas de corto alcance.

El uso de las WSN está creciendo exponencialmente, integrándose a muchas áreas de aplicación [5] motivado por su bajo costo de despliegue, bajo consumo de energía, nodos multifuncionales, y la posibilidad de comunicación a corta y larga distancia [36].

Algunas tecnologías de WSN son ZigBee [37], Wi-Fi [38], , MiWi [39], EnOcean [40].

En la Tabla 2.2 se muestra el alcance de algunas tecnologías de corto alcance.

Tabla 2.2 Alcance de algunas tecnologías inalámbricas de corto alcance.

	ZigBee	WiFi	MiWi	EnOcean
Alcance	10-100 m	100 m	10-100 m	Hasta 300 m

2.4.1. Protocolo ZigBee.

ZigBee es un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicaciones inalámbricas entre diferentes dispositivos que fue desarrollado por la alianza de varias empresas (*ZigBee Alliance*) [41]. El protocolo trabaja en una banda de frecuencias internacional sin licencia, tiene un bajo consumo de energía y baja tasa de transferencia de datos y se basa en el estándar IEEE 802.15.4 [42] que se encarga de definir las capas iniciales tanto física como de control de acceso del protocolo..

El objetivo de ZigBee es servir como plataforma para las aplicaciones que demandan comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías.

Las aplicaciones potenciales son sensores, juguetes interactivos, insignias inteligentes, controles remotos y domótica [43].

Características principales del protocolo ZigBee [41].

- ✓ Trabaja con velocidades comprendidas entre 20 kB/s y 250 kB/s.
- ✓ El rango de alcance de las comunicaciones punto a punto es de hasta 100 metros.
- ✓ Usa las bandas libres industrial científico y medico (*ISM Industrial Scientific and Medical*) (6) de 2,4 GHz (16 canales. Mundial), 868 MHz (1 canal Europa) y 915 MHz (10 canales EEUU).
 - ✓ Se puede formar una red ZigBee de un máximo de 65536 nodos distribuidos en subredes de 256 nodos.
- ✓ Es un estándar abierto.
- ✓ La instrumentación de un transmisor ZigBee contiene menos circuitos analógicos de los que se usan normalmente.
- ✓ Se puede trabajar con topologías de punto a punto, estrella, árbol, malla.
- ✓ La red puede ser más fácilmente escalable, brindando un mejor soporte para las redes más grandes, múltiples opciones de gestión, flexibilidad y desempeño.
- ✓ Bajo consumo de energía.
- ✓ Mejora la capacidad para dividir mensajes largos y permite el entendimiento con otros protocolos y sistemas.
- ✓ Puede cambiar de canales en forma dinámica cuando se presentan interferencias.

Otras características del protocolo ZigBee [44].

- ✓ Permite expandirse en grandes sistemas sin pérdida de función.
- ✓ Facilita comunicaciones extendidas en los sistemas que lo requieran.
- ✓ Útil para sistemas que utilizan patrones de comunicación no direccionales.
- ✓ Mejora los sistemas con función intermitente de los módulos individuales debido a pérdida de potencia o funcionamiento cíclico.
- ✓ Conformación redes a gran escala con funcionamiento de baja potencia en dispositivos finales.
- ✓ Facilidad de integración de dispositivos vinculados o dispositivos que se mueven.
- ✓ Sistemas que requieren interoperabilidad entre dispositivos hechos por diferentes proveedores.
- ✓ Si falla algún dispositivo, la red se auto-repara y se auto-direcciona asegurando la conexión en todo momento.
- ✓ Fácil integración en los equipos.

Tabla 2.3, se presentan algunas ventajas y desventajas de esta tecnología.

Tabla 2.3. Ventajas y desventajas del uso del protocolo ZigBee (adaptada de [37])

Ventajas	Desventajas
Trabaja en la banda libre de ISM 2.4 Ghz.	Baja transferencia de datos
Óptimo cuando se requiere en una red una tasa baja de transferencia de datos.	Solo tiene capacidad para manipular pequeños textos.
Alojamiento de 16 bits a 64 bits de dirección extendida.	Baja cobertura
Los tiempos de espera en la recepción y envíos de datos se reducen.	
Configuración de la red con diferentes topologías: Malla, estrella, estática y dinámica.	
Múltiples nodos en una red.	
Comunicaciones seguras entre dispositivos.	
Permite conexiones punto a punto y punto a multipunto.	
Bajo consumo energético.	

2.4.2. WiFi.

Wi-Fi [45], por sus siglas en inglés de *Wireless Fidelity* está compuesto por muchos estándares que facilitan la comunicación inalámbrica. Se basa en las especificaciones del

protocolo IEEE 802.11 [9]. Se concibió inicialmente para conectar redes inalámbricas locales, pero su uso en la actualidad es principalmente para la conexión a internet [46].

En la Tabla 2.4 se presentan las ventajas y desventajas de esta tecnología.

Tabla 2.4. Ventajas y desventajas de WiFi (adaptada de [47])

Ventajas	Desventajas
Los dispositivos se conectan fácilmente de manera inalámbrica.	Se pueden presentar fallas en la comunicación inalámbrica.
Todo el que tenga acceso a la red puede conectarse inalámbricamente.	Se pueden presentar vulnerabilidad en la seguridad.
No se utilizan cables para conectar los dispositivos.	Límite de distancia para recepción de la señal.
Gran número de redes con seguridad y libres disponibles para conectarse.	Alto consumo de energía.
Acceso de múltiples dispositivos a la red.	Menor velocidad con respecto a una conexión cableada.
Acceso a información en tiempo real	Incompatibilidad con otros dispositivos de comunicación inalámbrica.

2.4.3. Protocolo MiWi

Este protocolo fue propuesto para trabajar con redes domésticas comerciales, inteligentes y de bajo costo. Se puede utilizar en aplicaciones como sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (*HVAC, heating, ventilation and air conditioning*) y en dispositivos de alarma donde se requiera configurar una red de malla de auto corrección confiable. El protocolo MiWi se basa en el estándar IEEE 802.15.4. [52] y trabaja en la frecuencia PHY IEEE 802.15.4 en las bandas ISM sub-GHz y 2.4 GHz [48].

Ofrece una huella significativamente menor en relación con la pila de protocolos basada en ZigBee de estándares abiertos, permitiendo la operación en micro controladores con menor memoria / menor costo. Un nodo final típico requiere solo 20 KB de espacio de código [39]. La Tabla 2.5 muestra algunas ventajas y desventajas de MiWi.

Tabla 2.5 Ventajas y desventajas de MiWi (adaptada de [49])

Ventajas	Desventajas
Código abierto cuando se usa hardware de microchip. Bajo consumo de energía. Ideal para baja transferencia de datos. El tamaño de códigos para el hardware es más pequeño frente a otras tecnologías.	Baja transferencia de datos. Protocolo propietario.

2.4.4. Protocolo EnOcean

Es un protocolo de comunicación inalámbrica ratificado como estándar IEC Internacional (ISO/IEC 14543-3-10) en 2012 [50]. Su principal característica es el poco consumo de energía, prácticamente no requieren fuentes de alimentación para sus dispositivos [51] porque la tecnología aprovecha la energía que se encuentra en el entorno del dispositivo, transformándola en energía eléctrica. También se pueden alimentar con algún tipo de energía alternativa en caso de necesidad [52].

La banda que utiliza esta tecnología para sus comunicaciones es 868MHz, su velocidad de transferencia 25 kb/s, y un alcance de aproximadamente 300 metros. Los dispositivos que recolectan la información se comunican con el coordinador solo cuando reciben suficiente energía del entorno [53].

En la Tabla 2.6 se muestran algunas ventajas de EnOcean.

Tabla 2.6 Ventajas y desventajas de EnOcean (adaptada de [52])

Ventajas	Desventajas
Mínimo consumo de energía. Mantenimiento mínimo.	Su alcance es relativamente corto (300 Metros). Comunicación punto a punto.
Amigables con el medio ambiente. Número ilimitado de sensores.	No soporta enrutamiento. Ultra baja tasa de transferencia.

2.5. Tecnologías inalámbricas de largo alcance.

Dentro de esta clasificación se encuentran tecnologías como Wi-Fi HaLow, DigiMesh, LoRa y SigFox. En la Tabla 2.7 se muestran el alcance de estas tecnologías de largo alcance.

Tabla 2.7 Alcance de algunas tecnologías inalámbricas de largo alcance.

	WiFi HaLow	LoRa	DigiMesh	SigFox
Alcance	Hasta 1 km	5 km urbano	Hasta 64 Km/salto	Hasta 10 km urbano
		Hasta 15 km rural		hasta 30 km rural

2.5.1. WiFi HaLow.

Es una tecnología que busca satisfacer la necesidad de la industria cuando se requiere una conexión inalámbrica de baja potencia. WiFi Alliance ha introducido WiFi HaLow, con productos que incorporan la tecnología IEEE 802.11ah [43]. Trabaja en frecuencias inferiores a 1 GHz, proporciona una conexión de mayor alcance y baja potencia, permite bajo consumo de energía en automóviles conectados, Smart Home, entornos industriales y Smart City [54].

Opera en la banda de 900 MHz, facilitando la conectividad de baja potencia para red de sensores y otros dispositivos móviles con el doble del alcance del WiFi actual. Además, tiene la posibilidad de poder garantizar una conectividad más sólida en ambientes donde se presenten obstáculos que no permiten mantener la comunicación.

Trabaja con los protocolos de WiFi, soportando la interoperabilidad de diferentes proveedores, una fuerte seguridad de nivel gubernamental y una configuración fácil [43].

En la Tabla 2.8 se muestran algunas ventajas y desventajas de WiFi HaLow.

Tabla 2.8. Ventajas y desventajas de WiFi HaLow (adaptada de [54])

Ventajas	Desventajas
Mayor rango de cobertura.	Baja tasa de transferencia de datos.
Conexión directa a la red de un router.	Falta de herramienta para la gestión de algunos dispositivos como por ejemplo teléfonos inteligentes.
Trabaja en una banda de 900 MHz.	Mayor consumo energético.
Rendimiento superior que el de las frecuencias 2.4 GHz y 5GHz.	
Mayor transferencia de datos	
Conexión cuando hay presencia de paredes y otras barreras gracias a su gran robustez.	
Soporta miles de nodo sin presentar saturación.	

2.5.2. Protocolo LoRa

LoRa (*Long Range*) es una tecnología de modulación de espectro extendido derivada de la tecnología de chirp (CSS). Es una plataforma inalámbrica de largo alcance y baja potencia que está teniendo mucho auge en la Internet de las cosas (*Internet of Things, IoT*) [55]. Los dispositivos LoRa y el protocolo abierto LoRaWAN permiten aplicaciones inteligentes de IoT que resuelven algunos de los mayores desafíos que enfrenta nuestro planeta: administración de energía, reducción de recursos naturales, control de contaminación, eficiencia de infraestructura, prevención de desastres y más [56]. Los dispositivos LoRa de Semtech y el protocolo LoRaWAN han acumulado varios cientos de casos de usos conocidos para ciudades inteligentes, hogares y edificios inteligentes, agricultura inteligente, medición inteligente, cadena de suministro inteligente y logística, y más [55].

LoRa trabaja en las bandas 433 MHz, 868 MHz y 915 MHz, existiendo restricciones en algunas de ellas, por ejemplo en Europa no se permite la banda de 915 Mhz [57].

Características principales del Protocolo LoRa [57].

- ✓ Conectividad de largo alcance.
- ✓ Conexiones seguras, debido a la posibilidad de varias encriptaciones.
- ✓ Baja potencia.
- ✓ Altamente escalable.
- ✓ Bajo costo.
- ✓ Envío de datos en pequeños paquetes en dos direcciones.
- ✓ Consumo ultra bajo de energía.
- ✓ Geo localización en el interior y exterior con precisión.
- ✓ Costos de conectividad bajos con respecto a otras tecnologías.
- ✓ Es un protocolo abierto.

En la Tabla 2.9 se muestran algunas ventajas y desventajas de LoRa.

Tabla 2.9. Ventajas y desventajas de LoRa (adaptada de [55])

Ventajas	Desventajas
Buena respuesta ante las interferencias.	Baja tasa de datos.
Alta sensibilidad para recibir datos (168dB)	Es un estándar privado.
Se fundamenta en la modulación “chirp”.	Los proveedores que se usan deben ser aprobados por Semtech.
Bajo Consumo.	Difíciles de trabajar con redes privadas.
Largo alcance 10 a 20 km.	Capacidad limitada de enlace descendente.
Baja transferencia de datos (hasta 255 bytes)	
Conexión punto a punto.	

2.5.3. DigiMesh.

DigiMesh es un protocolo de red inalámbrica sin jerarquización desarrollado por Digi International Inc. Forma una red de malla inalámbrica [58]. que permite operar con baja potencia [61]. El protocolo es actualmente compatible con varios módulos de radio Digi de 900 MHz, 868 MHz, 865 MHz y 2.4 GHz [59].

Un aspecto único de DigiMesh, en comparación con otros protocolos como ZigBee o Z-Wave, es que todos los dispositivos en una red DigiMesh son del mismo tipo, no se requiere

una arquitectura compleja para definir diferentes nodos en una red como nodos finales, enrutadores, coordinadores o, enrutadores fronterizos [59].

En la Tabla 2.10 se presentan algunas ventajas y desventajas de DigiMesh.

Tabla 2.10. Ventajas y desventajas de DigiMesh (adaptada de [59])

Ventajas	Desventajas
Tiene un solo tipo de nodo.	Protocolo propietario.
Los nodos pueden recibir y enviar datos.	Se pueden presentar dificultades para la conexión con otros dispositivos.
Los nodos se pueden configurar como de baja potencia.	Baja transferencia de datos.
Bajo consumo de energía.	
La red se puede configurar de una manera simple.	
Fácil expansión de la red.	
La red configurada es bastante sólida.	

2.5.4. Protocolo SigFox.

SigFox es una red IoT con bajo consumo, de largo alcance y baja velocidad que permite la comunicación de datos entre dispositivos sin soporte de un dispositivo móvil o estar fijado a la cobertura o disponibilidad de una red móvil [60].

Trabaja sobre bandas de frecuencia de uso libres en todo el mundo como son las bandas ISM.

Puede transmitir a una de tasa desde 100 bits hasta 600 bits, dependiendo de cada país [62].

Es además energéticamente estable [61].

En la Tabla 2.11 se presentan algunas ventajas y desventajas de este protocolo.

Tabla 2.11 Ventajas y desventajas de SigFox (adaptado de [60])

Ventajas	Desventajas
Bajo consumo energético.	Disponible en pocos países.
Alta penetración de la señal ante la presencia de obstáculos.	Red cerrada.
Flujo de información bidireccional.	Envío de pequeños mensajes.
Alto nivel de seguridad.	
Amplia cobertura.	
Proporciona y administra la red.	
Hardware abierto.	

Capítulo 3. Redes de sensores inalámbricas de corto alcance: ZigBee.

3.1. Introducción.

Después de revisar los diferentes protocolos inalámbricos y teniendo en cuenta las características de estos protocolos y las necesidades de esta tesis se determinó trabajar con los protocolos ZigBee y LoRa.

El protocolo ZigBee es una tecnología que trabaja con un gran número de dispositivos usados en internet de las cosas (IoT) [62], aumenta las opciones y la flexibilidad de los sistemas. Tiene bajo consumo energético. Usa la banda libre 2.4 MHz. Trabaja con diferentes topologías de red. Estándar abierto. Se puede configurar para trabajar con dispositivos con movimiento. Su cobertura es aproximadamente de unos 100 metros. Permite conexiones punto a punto y multipunto. Configuración con múltiples nodos en una red. Gracias a todas estas características se escogió este protocolo de comunicaciones inalámbrica.

Se puede configurar en diferentes topologías. En el caso de esta tesis se trabaja con la topología en estrella. Con un nodo coordinador y varios nodos transmisores. La arquitectura de la WSN propuesta es modular. El sistema se puede adaptar a las necesidades del área de interés.

Se basa en una red de sensores inalámbricos estáticos desarrollados para aplicaciones urbanas, llamada sistema de información urbano (UIS, *Urban Information System*) [33]. Este sistema permite un rápido despliegue en la zona de interés. Está implementado con nodos de sensores inteligentes, capaces de recolectar información medio ambiental, transmitirla al coordinador para su almacenamiento, integrándose además con una base de datos externa. Para mejorar el alcance y la flexibilidad se ha desarrollado un nodo móvil. Ha sido diseñado

para permitir la instalación a bordo de vehículos, por lo que el área en estudio puede modificarse sin la necesidad de volver a desplegar los nodos UIS.

3.2. Protocolo ZigBee.

ZigBee es una tecnología para comunicaciones inalámbricas de área personal (*Wireless Personal Area Network*, WPAN), desarrollada por ZigBee-Alliance [41]. Está basado en el estándar IEEE 802.15.4 [63]. Está diseñado especialmente cuando se requieren conexiones de baja velocidad y bajo consumo de energía. Su tasa de transferencia va de 20 kb/s a 250 kb/s y el alcance en las comunicaciones punto a punto es de 100 metros, dependiendo de los obstáculos entre el emisor y el coordinador. Este estándar puede operar en 16 canales y puede utilizar el direccionamiento de 64 bits.

Las redes WPAN se sintonizan usando un ancho de banda de uso no comercial, denominado (ISM) [64]. La frecuencia de 2.4 GHz se usa a nivel mundial, por ejemplo en Colombia [65], y las frecuencias de 868 MHz y 915 MHz Europa y en Estados Unidos, respectivamente [66]. El estándar ZigBee adoptó el algoritmo de protección AES (*Advanced Encryption Standard*) para mejorar la seguridad de la red, con opciones de autenticación y encriptación [67].

Con este estándar se pueden configurar diferentes topologías de red. Algunas topologías permiten que los nodos que pierden conexión se puedan conectar con nodos vecinos.

Para la creación de la red ZigBee debe definirse un nodo coordinador. Éste es el encargado de seleccionar algunos parámetros, como son el valor del canal para la transmisión, el nivel de energía, el identificador único de la red ID PAN y el ID PAN extendida de 64 bits, que es una extensión de la ID PAN básica de 16 bits. [68]. La establece el nodo coordinador cuando se forma la red. Estos parámetros definidos por el nodo coordinador se hacen extensibles al resto de los elementos de manera que puedan integrarse en la red.

En la Tabla 3.1, se muestra un resumen de las características del estándar ZigBee.

Tabla 3.1 Características del estándar ZigBee.

Bandas de frecuencia rango de transmisión de datos	868 MHz-20kb/seg, 915 MHz-40 kb/seg, 2.4 GHz-25 kb/seg
Alcance	10-700 m.
Latencia	<15 ms
Canales	868/915 MHz: 11 canales 2.4 GHz: 16 canales
Modos de direccionamiento	64 bits IEEE
Canal de acceso	CSMA-CA
Seguridad	128 AES
Red	Hasta un máximo de 65536 nodos distribuidos en subredes de 256 nodos
Rango de temperatura	De -40 °C a +85 °C

3.2.1. Arquitectura del Protocolo ZigBee.

Debido a que ZigBee se basa en el estándar IEEE 802.15.4 [69], la capa de comunicación, debe coincidir con la de este estándar. En la Figura 3.1 se muestra el modelo OSI (*Open System Interconnect*) [70] y la correspondencia con el estándar 802.15.4/ZigBee [8].



Figura 3.1 Correspondencia del Modelo OSI con 802.15.4/ZigBee (adaptada de [8]).

El protocolo ZigBee aporta las siguientes propiedades destacadas [71]:

- Seguridad extra en la red, gracias a la autenticación y encriptación de la red.
- Bajo consumo energético: los nodos que no están en comunicación con el nodo coordinador permanecen en estado de bajo consumo, en lo que se denomina ciclo de sueño.
- Los nodos que se asocian a la red son los nodos que se pueden comunicar con el nodo coordinador y/o los que solicitan acceso a la red.
- Los datos pueden llegar al nodo coordinador desde distintos caminos, gracias al protocolo de enrutamiento AODV (*Ad hoc On Demand Distance Vector Routing*).
- En la capa de aplicación se puede trabajar con agrupaciones.
- Se puede trabajar con el direccionamiento de 16 bits y 64 bits.
- Se puede utilizar la topología de red tipo estrella (ver sección 3.4.1), que garantiza un consumo bajo de energía, debido a que los dispositivos finales permanecen el mayor tiempo dormidos.

Para esta tesis uno de los protocolos de comunicación que se ha seleccionado es ZigBee, debido a que se configura la red rápidamente, es flexible, tiene bajo consumo energético, seguridad extra, entre otros. Esto lo hace apropiado para diversas aplicaciones que ha desarrollado el grupo [72] [33]. En el grupo de investigación se ha venido trabajando con este tipo de dispositivos, con lo que había experiencia y disponibilidad de los equipos. Por tanto, se ha decidido utilizar esos mismos equipos para implementar las arquitecturas propuestas en esta tesis y realizar los experimentos que le den validez.

3.2.2. Enrutamiento de paquetes.

Una de las características por las que destaca el protocolo ZigBee es la capacidad de enrutamiento de paquetes de datos, es decir empaquetar datos y enviarlos a través de la red, desde un nodo origen a otro destino. Para la comunicación entre nodos vía ZigBee se emplean tramas, debido a que el uso de una estructura aumenta la fiabilidad en condiciones complicadas de transmisión. En la Figura 3.2 se muestra la estructura de la trama.

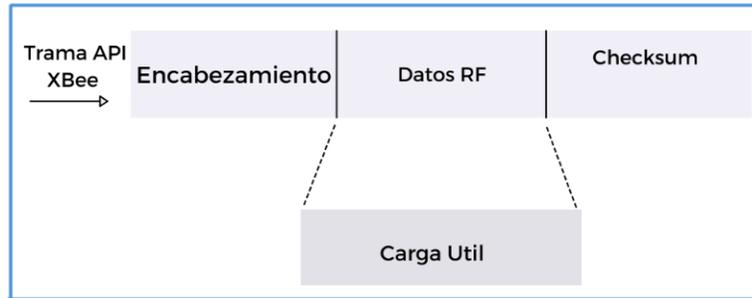


Figura 3.2 Estructura de la trama (adaptada de [19]).

La trama tiene la siguiente estructura: el encabezado, el paquete de datos y un checksum, que es el encargado de verificar los datos enviados [19].

El protocolo ZigBee trabaja con diferentes tramas como las siguientes:

- **Trama de datos.**

Es la encargada de transportar la carga de datos. Su capacidad máxima en tamaño es de 104 bytes, aunque esta restricción puede ser modificada por el desarrollador de las aplicaciones [73].

De igual manera se puede fragmentar el paquete de datos en varias tramas para que no sobrepase el tamaño máximo permitido. Posteriormente en el nodo destino se unifican las tramas y se reconstruye el paquete de datos enviado y recibido.

- **Trama de Ack (*Acknowledgement*).**

Esta trama tiene como principal función validar que la trama que se recibe por el dispositivo coordinador no tenga ningún error. Este coordinador envía una trama tipo Ack (*acknowledgement* o reconocimiento) donde confirma que el proceso ha sido satisfactorio [73].

- **Trama de comandos y configuración.**

Después de definir la configuración inicial de la red, esta trama se puede utilizar para cambiar la configuración de cada uno de los nodos de manera remota [73].

- **Trama baliza.**

Esta trama se encarga de despertar de su ciclo de sueño a los dispositivos que reciben información de otros nodos que previamente almacenan estos datos, hasta que estos despierten para recibirla [73].

Además, garantiza la sincronización de los nodos sin importar que estén en su ciclo de sueño para que puedan recibir los datos cuando lleguen. De esta manera no están activos todo el tiempo consumiendo batería.

El tamaño de las direcciones varía entre 0 y 20 bytes dependiendo de la función de la trama. Es decir, si necesita información de la fuente (*source*) y del destinatario (*destiny*). Por ejemplo, la trama de confirmación no tiene ninguna dirección, mientras que la trama de guía sólo alberga información de la dirección de la fuente [19].

Se pueden utilizar dos tipos de direccionamiento, el de 16 bits y el de 64 bits. Se emplean en redes que trabajan con balizas y las que no las utilizan.

El direccionamiento más usado se conoce con el nombre ID PAN, que es el de 16 bits, pero pueden existir dos redes usando este direccionamiento, causando conflicto entre los direccionamientos. Para resolver este conflicto se opta por utilizar el direccionamiento ID PAN extendida de 64 bits.

Para acceder al canal el método que se usa depende de si en la red se emplean balizas. Cuando no se usan balizas el acceso se hace a través del estándar CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). Es el encargado de enviar la confirmación de la recepción correcta de los paquetes. Para esta red los nodos son independientes, pueden gestionar información e interactuar con los otros nodos, pero puede ocurrir que al nodo destino no le llegue la información o que el canal esté ocupado.

Este estándar permite proveer seguridad a dispositivos que permanecen el mayor tiempo dormido. Se activan periódicamente para permanecer en la red y recibir información de otros dispositivos.

Para acceder al canal con una red con balizas se usa una supertrama, que llega al nodo coordinador, es analizada por éste y estima el tiempo que debe emplear en el envío de las tramas de balizas.

Utilizando esta estructura se garantiza un bajo consumo energético. Por ejemplo, si el nodo coordinador trabaja con una sola batería este método es recomendable. Los nodos de la red escuchan cuando emite balizas. Un nodo no registrado que quiera conectarse a la red debe registrarse.

3.3. Perfil de red.

El perfil de red es la caracterización de los nodos que conforman la red ZigBee, y define la interfaz entre los nodos y los formatos de los mensajes [71]. Inicia con un nodo coordinador, encargado de crear la red. Cuando el nodo coordinador ha iniciado la red otros nodos pueden unirse a la misma, enviar información bidireccionalmente y almacenarla [74]. En la Figura 3.3 se pueden observar los dispositivos que pueden conformar una red ZigBee.

3.3.1. Nodo Coordinador ZigBee.

Este es un nodo obligatorio de la red, y se encarga de iniciarla y controlarla. Escoge su canal de comunicación, define las políticas de seguridad y envía los datos hacia su destino [75].

Permite que otros dispositivos se unan a la red tomando como referencia la configuración definida. Mantiene actualizado el listado de los nodos conectados, permitiendo que los nodos que se desconecten puntualmente vuelvan a conectarse directamente a la red. Tiene la capacidad de guardar información sobre la propia red, así como la gestión de las claves de seguridad. En algunas implementaciones también pueden guardar información que obtienen los nodos del entorno [76].

3.3.2. Nodo Router ZigBee.

Este dispositivo actúa como nodo intermedio, transmitiendo datos a otros dispositivos de la red. Permite que otros dispositivos se conecten a la red, teniendo en cuenta los parámetros de configuración, como son número máximo de dispositivos a conectar o el tiempo que

permanecen en la red [74]. Se utiliza en las topologías tipo árbol (ver sección 3.4.2) y malla (ver sección 3.4.3).

La principal función es ampliar la cobertura de la red y mejorar la confiabilidad creando rutas adicionales de paquetes de datos.

3.3.3. Nodo final.

Esto es un nodo de baja potencia. Consumen poca energía, ya que permanecen el mayor tiempo dormido. Entran en suspensión cuando no tienen comunicación activa con el nodo coordinador. Es el que incluye los sensores, y se comunica con el nodo coordinador o con el nodo router para entregar la información recolectada [76].

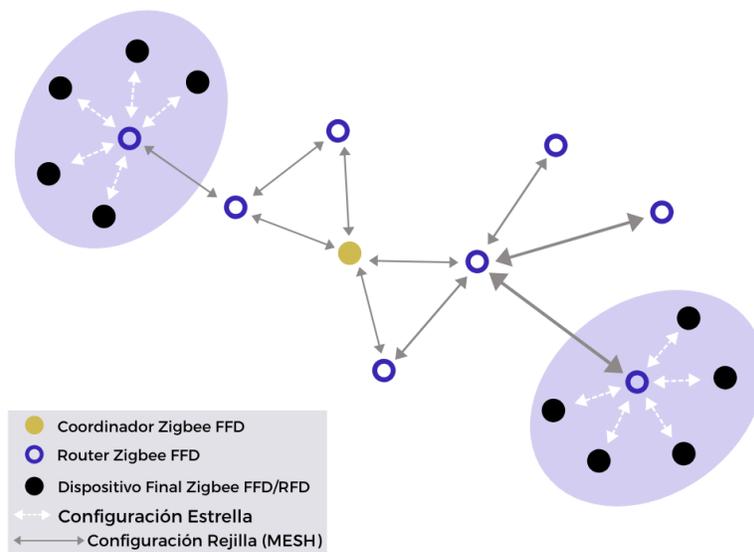


Figura 3.3. Dispositivos de una red ZigBee (adaptada de [77]).

3.4. Topologías de red.

La topología de red es la distribución física de la red y como los nodos intercambian datos [78]. ZigBee trabaja con las topologías de red en estrella árbol, y malla [76]. Es el nodo coordinador el que define y configura la topología de la red al iniciarla [74]. En esta tesis se

ha trabajado con la topología en estrella. La Figura 3.4 muestra ejemplos de configuración de las diferentes topologías.

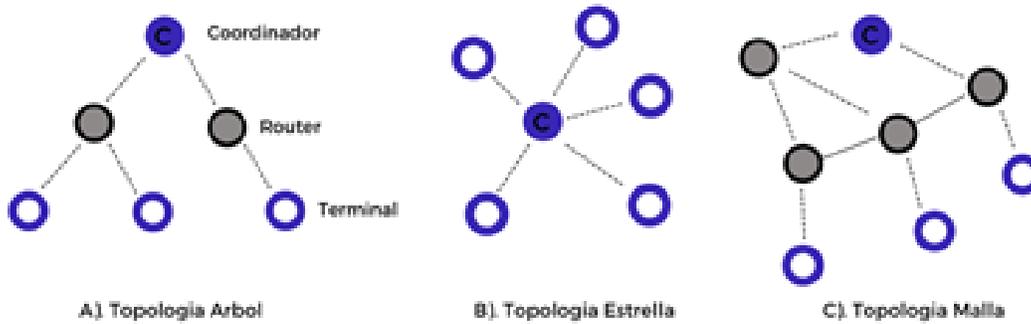


Figura 3.4. Topología de la red ZigBee. (adaptada de [79])

En la Tabla 3.2 se muestran algunas características de las diferentes topologías [80].

Tabla 3.2. Características de las topologías de la red.

	Estrella	Árbol	Malla
Latencia	Baja	Baja	Baja
Robustez	Baja	Media	Alta
Fiabilidad	Alta	Baja	Media
Sencillez	Alta	Media	Media
Despliegue	Rápido	Normal	Rápido
Gasto energético	Bajo	Medio	Bajo
Escalabilidad	Baja	Media	Alta
Colisión de datos	Medio	Medio-Alto	Alto

3.4.1. Topología en estrella.

Esta topología está conformada por el nodo coordinador, nodo router, y nodos finales. El coordinador es el centro de la red. Todos los nodos finales se comunican directamente con él [70].

Algunas características de esta topología son las siguientes:

- Un solo coordinador que puede tener desde uno a varios nodos hijos.
- El alcance de la red depende del rango de transmisión del nodo coordinador.
- La configuración de la red es sencilla.
- El Coordinador es el encargado de enrutar los datos.

3.4.2. Topología en árbol.

Se forma con un nodo coordinador, routers y dispositivos finales [81]. El nodo coordinador cumple las funciones de configurar la red. Autoriza que otros nodos que actúan como nodos finales puedan unirse a la red. El nodo router se comunica con el nodo coordinador y también con los nodos finales. Actúa además como enrutador de paquetes. Los nodos finales recogen la información y la envían al nodo coordinador o a los nodos routers [82].

Algunas características de esta topología son las siguientes:

- Los nodos que cumplen la función de enrutar paquetes de datos es posible que tengan nodos hijos.
- Comunicación directa a través de la relación padre-hijo.
- Ruteo jerárquico con un único camino posible entre dos nodos.

3.4.3. Topología en Malla.

En esta topología tenemos el nodo coordinador que cumple las mismas funciones que en las otras topologías [82]. Se conecta con varios routers. Los nodos finales (hijos) solo se comunican con sus padres (routers) [67]. Existe respaldo de la red. Los nodos que pierden comunicación forman una nueva malla, permitiendo que la red siga funcionando.

Algunas características de esta topología son las siguientes:

- Los nodos router pueden tener nodos hijos.
- Comunicación directa entre dos nodos FFD (*Full function device*, Dispositivo de funcionalidad completa) cuando están dentro del rango de transmisión entre ellos.
- Los nodos hijos solo se comunican con sus nodos padres.

- Se optimiza el ruteo teniendo en cuenta el gasto energético, tiempo, seguridad y confiabilidad.

3.5. Seguridad de la red.

Las redes inalámbricas ZigBee tienen como características que todos los nodos que tengan los mismos parámetros del que ha establecido el nodo coordinador pueden unirse a la red. Esto puede causar problemas en la seguridad [67]. Se hace necesario proveer de alguna manera la seguridad de la red.

La seguridad se aborda en diferentes frentes. Por una parte, la trama incluye un campo de checksum que se encarga de validar los datos transmitidos. Por otra parte, se codifica según el algoritmo *Advanced Encryption Standard*, AES 128 (ver sección 3.5.3). Este se encarga de cifrar los datos para que sean leídos por el destinatario. Además un método de autenticación *Control keys* como *Link Key*, *Network Key*, que permite validar los nodos que se unen a la red [33].

A continuación, se revisará con algo más de detalle cada uno de estos elementos.

3.5.1. Checksum.

Se valida que la información enviada esté correcta. La verificación se realiza sumando el número de bits ocupados en tres campos. La suma se guarda en formato hexadecimal, luego se realiza la resta de este valor guardado del valor hexadecimal FF. El resultado se almacena en el campo checksum [83].

3.5.2. Algoritmos Estándar de cifrado avanzado AES (Advanced Encryption Standard).

AES es un algoritmo de cifrado de clave simétrica. Permite longitudes de clave de 128, 192 y 256 bits. Cifra un bloque de bytes al mismo tiempo, a diferencia de los cifrados de flujo que codifican cada elemento individualmente. Esta característica permite que el algoritmo sea muy rápido. Tiene la ventaja de ocupar muy poca memoria y, en consecuencia, hace que sea muy adecuado para dispositivos de baja capacidad de memoria [84]. Además, para validar los datos que se envían. Este concepto se llama integridad de datos [85].

3.5.3. Fase de Encriptación y Autenticación.

Esta fase permite encriptar el paquete de datos que se está gestionando. Solo tienen acceso a estos datos los nodos que pertenecen a la red. Esta función se pone en práctica a través del algoritmo de seguridad AES 128. Además, provee una mayor seguridad de la red con el uso del método punto a punto con un algoritmo AES 256 [84] o comunicaciones WEB seguras a través de HTTPS-SSL-SSH [85]. En esta tesis se ha utilizado una capa adicional de seguridad de una implementación propuesta por Libelium. En la Figura 3.5 se muestra el sistema de encriptación propuesto.

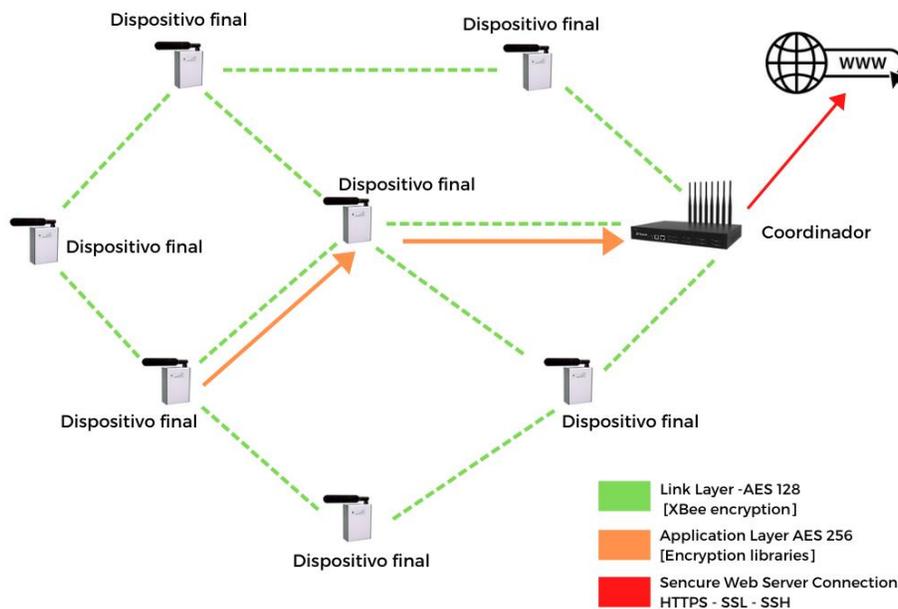


Figura 3.5. Sistema de encriptación propuesto por Libelium (adaptada de [84]).

3.6. Red estática: arquitectura e implementación.

En este apartado se muestra la arquitectura propuesta de la red de sensores inalámbrica (WSN), para un UIS. Su implementación se propone con dos tipos de nodos. Los componentes de hardware utilizados proceden de la empresa Libelium. Los datos obtenidos se almacenan en la base de datos interna del nodo coordinador y esto a su vez se sincroniza con una base de datos externa. Este sistema es el resultado del proyecto G-GI3000/IDIZ.

Título: Sistema Móvil de Información Aplicado a La Movilidad Urbana. Entidad financiadora: Agencia de Obra Pública de La Junta De Andalucía. Convocatoria: Consejería de Obra Pública y Vivienda, Junta de Andalucía, 2012. Fecha de inicio-fin: 01/2012-11/2015. Investigador Principal: J. Jesús Fernández Lozano. Fue evolucionando posteriormente gracias al trabajo de esta tesis, hacia el sistema que se describe a continuación.

3.6.1. Arquitectura del sistema

El sistema se basa en una red de sensores inalámbricos estáticos desarrollados para aplicaciones urbanas, llamada UIS [86]. Tiene una arquitectura modular para adaptar la configuración del sistema a las necesidades del área de interés. Originalmente se desarrollaron dos tipos diferentes de nodos: nodos transmisores y nodo coordinador. En la Figura 3.6 se muestra la configuración de la arquitectura del sistema propuesta.

La configuración básica de la plataforma UIS tiene topología en estrella (ver sección 3.4.1), donde se tiene un nodo coordinador (ver sección 3.3.1) que alberga una base datos interna y nodos transmisores que tienen un perfil de red de nodo final (ver sección 3.3.3). Estos nodos recopilan información del entorno urbano, como la MAC del Bluetooth, número de vehículos que cruzan el haz de ultrasonido, concentración de gases como NO_x, CO, CO₂, O₂, NH₃, VOC, intensidad de luz, ruido o polvo. El UIS se puede implementar con un número diferente de nodos transmisores [87].

El nodo coordinador configura y administra la red UIS. Una vez que la red se ha configurado, los nodos transmisores llevan a cabo la adquisición y el procesamiento de datos. Luego, los datos se envían al nodo coordinador, donde se actualiza y sincroniza una base de datos interna con la base de datos en un servidor externo. Una interfaz gráfica persona-máquina (HMI, *Human-Machine Interface*) presenta la posición geográfica de acuerdo a las coordenadas de la base de datos. Se puede instalar un kit solar en todos los nodos para que puedan ser independientes de la red eléctrica y a la vez autónomos desde el punto de vista energético. De esta manera, la implementación gana flexibilidad.

La flexibilidad en el despliegue es una de las ventajas de las WSN en comparación con la infraestructura fija. Los sensores se pueden colocar fácilmente y en poco tiempo, pero

también se pueden distribuir para estudiar un fenómeno particular. Por ejemplo, en el caso de UIS, se pueden desplegar nodos para estimar la matriz de origen-destino (matriz OD) para un conjunto particular de puntos [88]. Esta matriz representa el número de vehículos que van desde el origen i al destino j . Para estimar este número, se debe identificar una muestra relevante de los vehículos que viajan de i a j . En el caso del UIS se colocan nodos Bluetooth cerca de los puntos de interés [33]. Estos nodos recopilan la dirección MAC de los dispositivos Bluetooth dentro de su alcance (en realidad, un porcentaje de ellos) y los transmiten al nodo coordinador. Toda esta información se sincroniza con la base de datos en el servidor, y luego se estima la matriz OD, dado que se conoce la ubicación de los nodos Bluetooth [89]. Por lo tanto, la libertad de seleccionar los puntos donde se despliegan los nodos del transmisor es clave para que esta característica sea útil para los administradores de tráfico, que era el objetivo inicial de la red UIS.

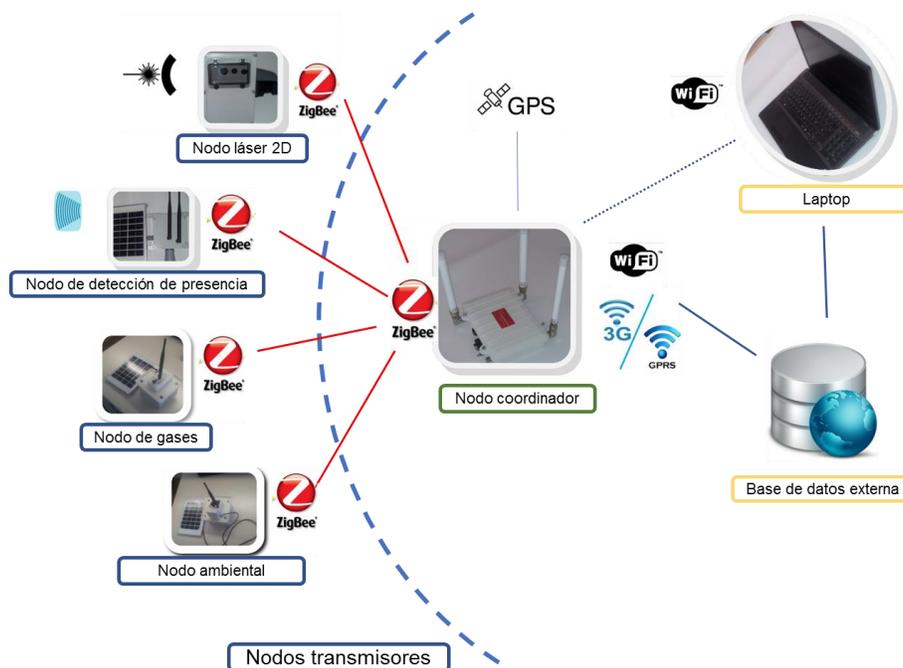


Figura 3.6. Arquitectura del sistema de la red de sensores inalámbricos estáticos UIS.

3.6.2. Implementación.

El sistema propuesto se ha desarrollado sobre la base de componentes de hardware proporcionados por Libelium [76]. Los nodos transmisores comparten un módulo básico, llamado Waspote V.1.2. La adición de un módulo de comunicaciones XBee Pro S2 proporciona la capacidad de utilizar protocolos como ZigBee o DigiMesh.

El nodo coordinador se basa en un router multiprotocolo llamado Meshlium. Configurado para trabajar con ZigBee, Wi-Fi, Bluetooth y protocolos 3G/GPRS, incluye también un GPS. El enlace entre el nodo transmisor y el nodo coordinador se ha implementado utilizando el protocolo ZigBee (2.4 GHz), puede transmitir pequeños paquetes de información con un alcance de más de 100 metros (dependiendo de las condiciones de visibilidad). La configuración de la red es rápida y simple, y también lo es agregar nuevos nodos.

Se han desarrollado varios nodos transmisores, incluidos diferentes sensores. De esta manera, el despliegue del UIS puede incluir los siguientes tipos de nodos:

- **Nodo Bluetooth UIS.** Incluye un módulo Bluetooth BLUEGIGA WT12 para la plataforma Waspote V1.2, junto con el módulo de comunicaciones XBee Pro S2, programado para trabajar simultáneamente con los protocolos inalámbricos ZigBee y Bluetooth 2.1 + EDR.
- **Nodo de ultrasonido UIS.** Agrega un sensor ultrasónico XL-MaxSonar-WR1 (Maxbotix, Brainerd) a la configuración inicial. Estos sensores funcionan a una frecuencia de 42 KHz y alcanzan el rango máximo de 6 metros con una sensibilidad de 3.2 mV/cm a 3.3 V, o 7 m y una sensibilidad de 4.9 mV/cm a 5.5 V.
- **Nodo láser UIS.** Se basa en una placa de procesador Nano Pico ITX 1.2 GHz (Vía Technologies Inc., Taiwán) que incluye memoria DDR3 RAM de 4 GB y un disco duro de estado sólido con una capacidad de 60 GB. El sensor láser es un modelo Hokuyo UTM-30LX-EW. Su objetivo es clasificar los tipos de vehículos que cruzan una sección determinada.
- **Nodo de Contaminación Ambiental UIS.** Incluye un sensor de polvo (GP2Y1010AU0F, Sharp, Osaka, Japón), un sensor de intensidad de luz (fotorresistor GL5528, Lida Optical & Electronic Co. Ltd.) y un sensor de ruido (WM-61a, Panasonic).

- **Nodo de gas UIS.** Se compone de varios sensores de gas: O₂ (SK-25, de Figaro), O₃ (MICS-2610, de E2V), CO₂ (TGS 4161, de Figaro), CO (TGS 2442, de Figaro), NH₃ (TGS 2444, de Figaro), VOC (TGS 2600, de Figaro). Los sensores adicionales incluyen humedad (J808H5V5, de Jin Zon Enterprise Co. Ltd.), presión atmosférica (MPX4115A, de Motorola) y temperatura (MCP9700 / 9701).
- **Nodo GPS.** Incluye un módulo GPS (Júpiter N3 de Telit).

Todos los nodos transmisores están montados en cajas IP 67, de modo que el sistema se puede implantar en exteriores en condiciones climáticas adversas. La Figura 3.7 muestra diferentes nodos de la plataforma UIS.

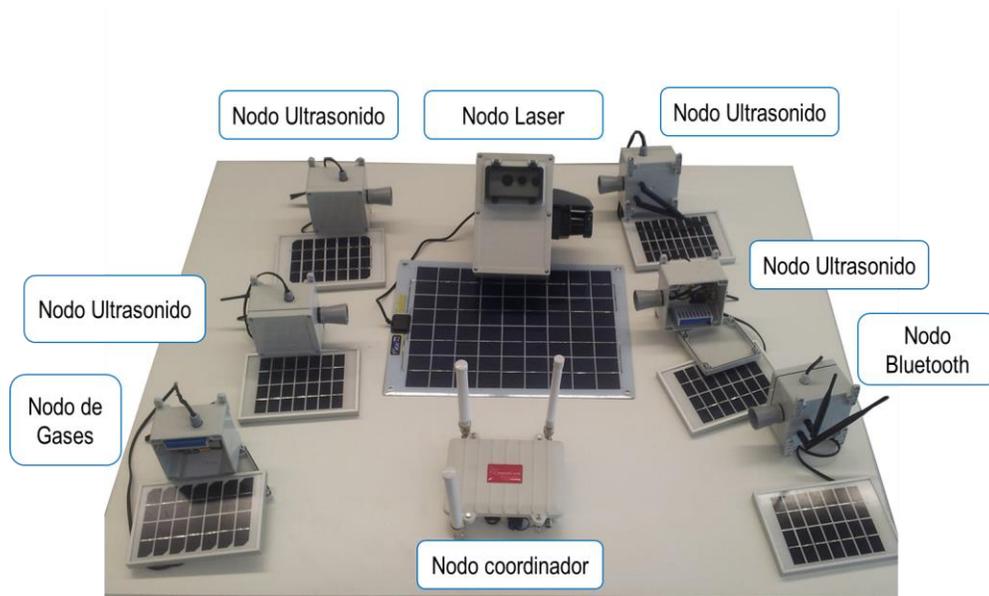


Figura 3.7. Diferentes tipos de nodos desarrollados para el Sistema de Información Urbana.

La información recopilada del área de interés se envía al nodo coordinador y se almacena como tablas en su base de datos interna. Estas tablas se sincronizan con una base de datos relacional implementada con MySQL v.7.0 (Oracle) en un servidor externo. La sincronización se realiza a través de la comunicación 3G, o Wi-Fi si está disponible. Esta base de datos es la entrada para una HMI desarrollada para esta aplicación usando LabVIEW, v. 2015 (National Instruments), donde la información adquirida por los sensores se muestra

de acuerdo con su ubicación geográfica. La HMI se sincroniza con la base de datos externa a través de una cadena de conexión utilizando ODBC v. 13.1 (Microsoft).

3.7. Nodo móvil.

Las WSN son una solución para adquirir información cerca del área de interés con persistencia en el tiempo [90]. Sin embargo, una aplicación exitosa requiere prestar mucha atención a la cobertura de la red, la conectividad o la sobrecarga de la red [91]. Las H-WSN, pueden proporcionar una solución a algunos de estos desafíos. Esta sección presenta una arquitectura e implementación de nodos móviles, y su integración con un WSN estático para obtener H-WSN. Los datos adquiridos por los sensores en el nodo móvil están disponibles para cualquier usuario a través de la base de datos, como los datos de cualquier otro sensor en la red estática. La red de sensores inalámbricos se transforma luego en una red de sensores inalámbricos híbridos (H-WSN).

3.7.1. Estructura general.

El UIS es una WSN estática. Proporciona información útil sobre un área de interés. Puede implementarse con rapidez y flexibilidad para adaptarse a los requisitos de cada caso. Pero una vez que se despliega la red, los nodos permanecen en la misma ubicación. La obtención de información adicional requiere la instalación de nodos transmisor adicionales y dependiendo de la distancia, también del nodo coordinador. Esto debido al alcance limitado de las comunicaciones de ZigBee.

Algunos casos de uso requieren un enfoque diferente, como el estudio de las emisiones de gases. Una cantidad significativa de emisiones en las zonas urbanas está vinculada a los vehículos de motor. Obtener información actualizada sobre los niveles de algunos gases puede ser muy relevante para los gestores de tráfico. Pero implementar una red de sensores lo suficientemente grande como para cubrir una ciudad entera podría no ser práctico. Una forma de obtener los datos relevantes que requieren los administradores de tráfico es mediante sensores instalados directamente en los vehículos. Pero algunas otras aplicaciones requieren también la capacidad de medir datos ambientales de una manera rápida y adaptable, como en la robótica de desastres, donde la colaboración con humanos o perros puede verse

limitada por el nivel de algunos gases. Para aquellas aplicaciones que requieren flexibilidad adicional en la adquisición de información, se ha desarrollado una versión híbrida de la red UIS.

Estas características se pueden lograr transformando el WSN estático en un H-WSN agregando un nodo móvil.

3.7.2. Arquitectura e Implementación.

El nodo móvil se ha desarrollado para mejorar el alcance y la flexibilidad del UIS. Ha sido diseñado para permitir la instalación a bordo de vehículos, por lo que el área en estudio puede modificarse sin la necesidad de volver a desplegar los nodos UIS.

Una arquitectura modular era deseable para que el conjunto de sensores pudiera modificarse de acuerdo con las necesidades de la misión. Al mismo tiempo, uno de los requisitos era usar los nodos originales con la menor cantidad de modificaciones posible. Pero dado que los nodos del transmisor envían sus datos utilizando el protocolo ZigBee, tienen un rango limitado, que se ve afectado por los obstáculos entre el emisor y el coordinador.

Para superar esta limitación, una posibilidad es configurar los nodos ZigBee como enrutadores, lo que permite el enrutamiento de múltiples saltos para llevar los datos del nodo transmisor al nodo coordinador. Sin embargo, esta opción limita la flexibilidad de un nodo móvil, ya que solo podía moverse alrededor de la posición de los nodos ya desplegados. Para cumplir con todos los requisitos, se diseñó una arquitectura modular que incluye un nodo coordinador y un número configurable de nodos transmisores UIS estándar, para que no se requieran cambios de hardware. El nodo coordinador recopila la información de los nodos transmisores y la sincroniza con la base de datos en el servidor externo a través de 3G o Wi-Fi. De esta manera, el nodo móvil puede adquirir datos de áreas sin la necesidad de nodos ZigBee previamente implementados entre el nodo coordinador y el área de interés. En la Figura 3.8 se muestra la arquitectura propuesta del nodo móvil.

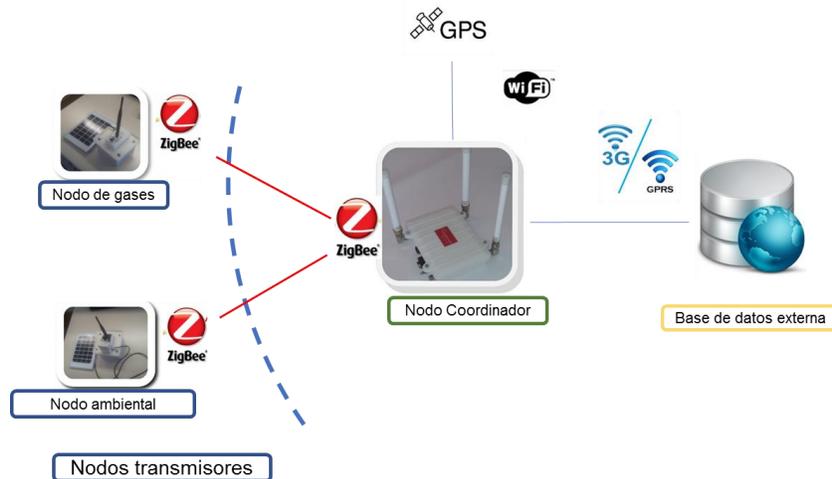


Figura 3.8. Arquitectura del nodo móvil.

En la Figura 3.8 se muestra un conjunto de nodos incluidos en el nodo móvil. En este caso, se incluyen un nodo de gas y un nodo ambiental como nodos transmisores, junto con el nodo coordinador. Debe notarse que el nodo transmisor puede contener varios sensores, que pueden cambiarse de un experimento a otro dependiendo de los requisitos de la misión. Por ejemplo, el nodo de gas puede equiparse con diferentes conjuntos de sensores de gas, incluidos CO_2 , CO , O_2 , VOC o NH_3 .

El nodo móvil tiene dos modos de trabajo posibles: modo local y modo en red. En ambos modos, los nodos transmisores adquieren y procesan datos del entorno y los envían al nodo coordinador embarcado. Los modos difieren en la forma en que se construye una trama antes de almacenarlo en la tabla local y sincronizarlo con la base de datos externa.

La implementación tenía que cumplir con el requisito de emplear los nodos originales con la menor cantidad de modificaciones posible. Por lo tanto, los cambios se han limitado al software del nodo coordinador. Estas modificaciones consistieron en la creación de dos configuraciones de software adicionales de acuerdo con los dos modos de trabajo diferentes. Esta configuración de software debe seleccionarse, previamente al inicio de un experimento. Así, es posible aumentar el alcance de comunicación de los nodos de sensores existentes sin la necesidad de integrar un nuevo segmento de radio con los nodos del transmisor, o el desarrollo de nuevas cadenas de conexión con el servidor externo de acuerdo con este nuevo

enlace de comunicación. Al mismo tiempo, es posible utilizar cualquier tipo de nodo transmisor que ya esté en uso por la red estática.

Ambos modos de trabajo usan la misma estructura de trama. Dentro de los diferentes tipos de trama para el protocolo ZigBee, se ha seleccionado una estructura de trama ASCII. La estructura de la trama se muestra en la Figura 3.9, donde:

- (A) Delimitador de inicio [3 bytes]: Está formado por tres caracteres "<=>".
 - (B) Byte indicador de tipo de trama [1 byte]: Este campo define si la trama es binaria (0 × 00) o ASCII (0 × 80).
 - (C) Número de campos de sensor [1 byte]: Especifica el número de campos de sensor incluidos en la trama, en hexadecimal.
 - (D) Separador [1 byte]: El inicio de cada campo está marcado con un carácter "#", así como el final de la trama.
 - (E) SerialID [10 Bytes]: Este campo está formado por una cadena numérica de 10 bits de longitud que identifica de forma exclusiva el dispositivo.
 - (F) NodeID [0–16 bytes]: Cadena de caracteres que etiqueta el nodo.
 - (G) Secuencia de trama [1–3 bytes]: Indica el número de secuencia de cualquier trama enviada. Está formado por 8 bits y numerado de 0 a 255. Cuando se alcanza el valor 255, el contador se restablece a 0. Cada nodo tiene su propio contador de trama.
- Sensor_i: campo específico de cada sensor que incluye una etiqueta de identificación y los datos que proporciona. Su longitud puede ser variable.

HEADER										PAYLOAD							
<=>	Frame Type	Num Fields	#	SerialID	#	NodeID	#	Sequence	#	Sensor data 1	#	Sensor data 2	#	...	#	Sensor data n	#
A	B	C	D	E	D	F	D	G	D	Sensor_1	D	Sensor_2	D	...	D	Sensor_n	D

Figura 3.9. Estructura de trama ASCII empleada en el nodo móvil (adaptada de [73]).

3.7.3. Modo local.

En este modo, el nodo móvil es visto por la red como un único nodo multisensor. Para hacerlo, se construye una trama mejorada que contiene la información de todos los sensores presentes en los nodos del transmisor dentro del nodo móvil.

Una vez que se reciben los datos de todos los sensores, el nodo coordinador crea una trama mejorada con datos de todos ellos, incluye datos de ubicación y actualiza la base de datos interna. La sincronización se realiza con la base de datos externa (a través de 3G o Wi-Fi, si está disponible), donde la información aparece como datos de un solo nodo. En la Figura 3.10 se muestra un diagrama de flujo de mensajes de protocolo simplificado para este modo de trabajo.

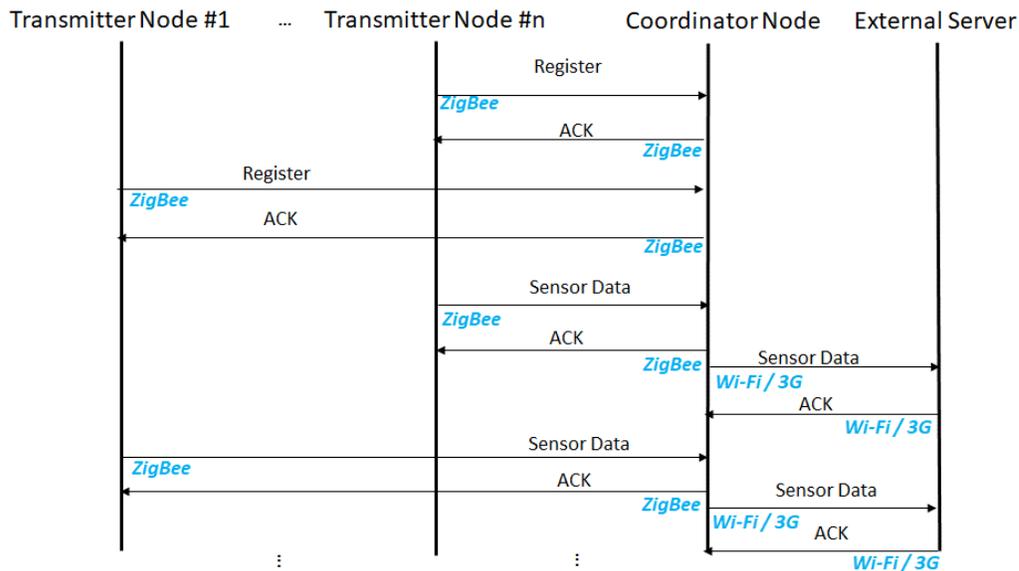


Figura 3.10. Diagrama de flujo de mensajes de protocolo simplificado para el modo local.

La Figura 3.11 muestra un ejemplo de parte de una trama mejorada construida integrando información de diferentes nodos transmisores. En este caso, se instala un nodo de gas que incluye varios sensores de gas. El nodo coordinador incluye datos de ubicación en un campo de sensor adicional.

HEADER										PAYLOAD										
<=>	0x80	0x09	#	3584685	#	Mobile	#	64	#	CO2:332.35	#	CO:32.44	#	O2:19.18	#	NH3:1.45	...	#	GPS: 36.720799, -4.485902	#
A	B	C	D	E	D	F	D	G	D	Sensor_1	D	Sensor_2	D	Sensor_3	D	Sensor_4	...	D	Sensor_9	D

Figura 3.11. Parte de una trama mejorada.

El modo local limita las comunicaciones, pero solo en el segmento 3G / Wi-Fi. Por lo tanto, la cantidad de datos disponibles en la base de datos externa se reduce: dado que una trama se actualiza en la base de datos solo cuando todos los nodos del transmisor han enviado sus datos, la dinámica de la adquisición de datos es tan lenta como el sensor más lento presente. Los nodos transmisores mantienen su propio ritmo enviando sus datos al nodo coordinador, pero solo se utilizan los datos más recientes de cada sensor para construir la trama mejorada. Dependiendo de los tipos de nodos, la presentación en tiempo real de los datos puede ser difícil de lograr.

3.7.4. Modo en red.

Una trama puede contener información de uno o varios sensores del mismo nodo transmisor. El nodo coordinador actualiza su base de datos interna y a continuación, la sincronización con la base de datos externa se realiza a través de 3G o Wi-Fi si está disponible. En la Figura 3.12 se muestra un diagrama de flujo de mensajes de protocolo simplificado para este modo de trabajo. En la Figura 3.13 se muestra una trama que incluye mediciones de CO₂ y O₂. En la Figura 3.14 se muestra una trama que contiene mediciones de tres sensores: NH₃, temperatura y humedad. La ubicación se obtiene por medio de un nodo GPS, que actúa como un nodo transmisor adicional. De esta manera, hay más datos de posicionamiento disponibles.

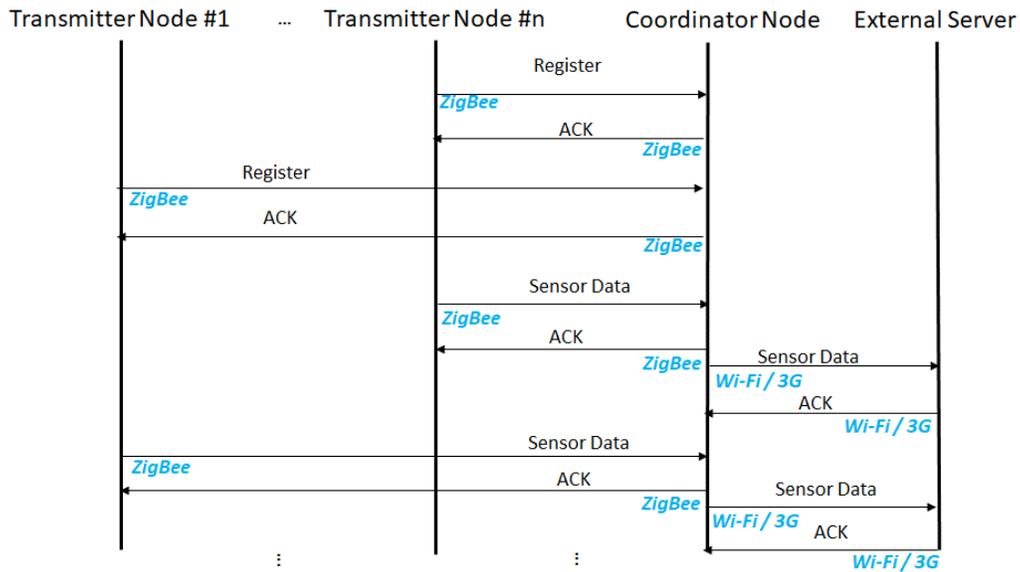


Figura 3.12. Diagrama de flujo de mensajes de protocolo simplificado para el modo en red.

HEADER										PAYLOAD			
<=>	0x80	0x02	#	35695678	#	NGAS	#	71	#	CO2:334.35	#	O2:19.24	#
A	B	C	D	E	D	F	D	G	D	Sensor_1	D	Sensor_2	D

Figura 3.13. Trama en modo de red con datos de dos sensores de gas.

HEADER										PAYLOAD					
<=>	0x80	0x03	#	35695678	#	NGAS	#	72	#	NH3:1.472	#	TEMP:21.94	#	HUM:78.8	#
A	B	C	D	E	D	F	D	G	D	Sensor_1	D	Sensor_2	D	Sensor_3	D

Figura 3.14. Trama en modo de red con datos de tres sensores de gas.

Este modo de trabajo pone a disposición una mayor cantidad de datos, a través de un mayor número de actualizaciones con la base de datos externa. Los datos también están disponibles para el usuario más rápido, ya que la sincronización de las bases de datos se realiza tan pronto como se recopilan nuevos datos.

3.7.5. Integración con la H-WSN

La red H-WSN gestiona los datos de los nodos estáticos y móviles de forma indiferente. La Figura 3.15 muestra la integración del nodo móvil (en el lado derecho) con una WSN estática (en el lado izquierdo), lo que da como resultado una red híbrida, H-WSN. El nodo coordinador actúa como un coordinador móvil, otorgando cobertura para los nodos transmisores siempre que haya cobertura 3G o Wi-Fi sin la necesidad de enrutamiento de múltiples saltos o métodos de reubicación dinámica, lo que puede reducir la vida útil de los nodos debido a una mayor comunicación.

Al transformar el WSN en H-WSN, el sistema resultante gana flexibilidad, ya que se puede implementar un nodo móvil para obtener datos de un área no cubierta por nodos estáticos (por ejemplo, en casos en que algunas pruebas hacen que valga la pena estudiar el área después despliegue original de la red). La robustez también se puede aumentar con el uso de un nodo móvil para sustituir los nodos estáticos que funcionan mal.

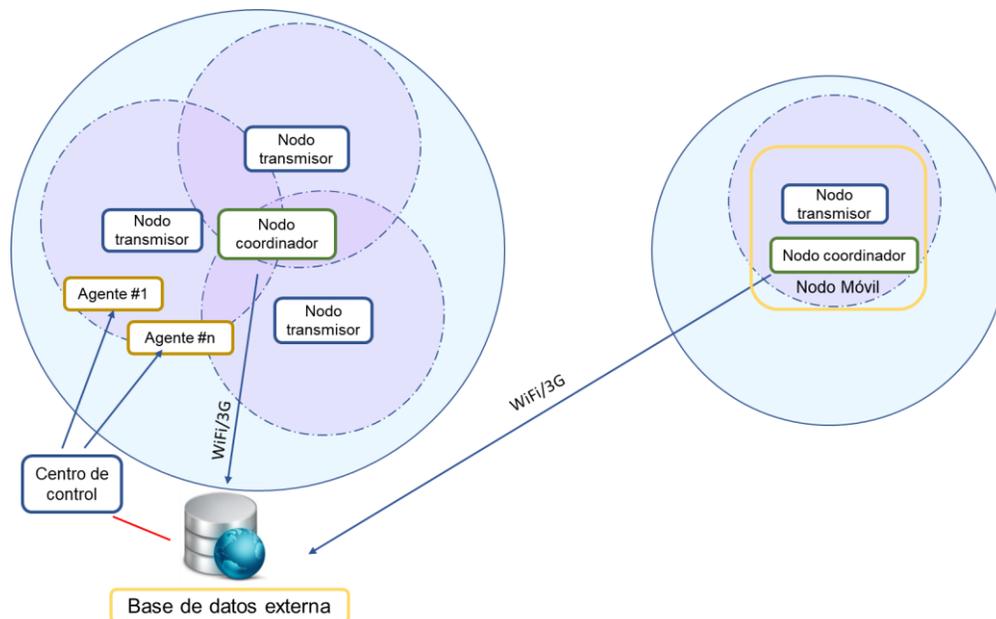


Figura 3.15. Integración del nodo móvil para crear una red de sensores híbridos-inalámbricos.

La base de datos externa es la entrada para una interfaz hombre máquina HMI desarrollada para esta aplicación usando LabView que se muestra en la Figura 3.16, lo que permite presentar la información obtenida por los diferentes sensores y relacionada con sus ubicaciones. El usuario puede configurar qué información de los sensores se muestra, de acuerdo con los nodos desplegados, incluidos los nodos estáticos. Por ejemplo, la Figura 3.16 muestra cómo el usuario puede ver las mediciones disponibles para CO₂, CO, O₂, NH₃, ozono (O₃), presión atmosférica, humedad relativa y temperatura, al comienzo de una ruta.

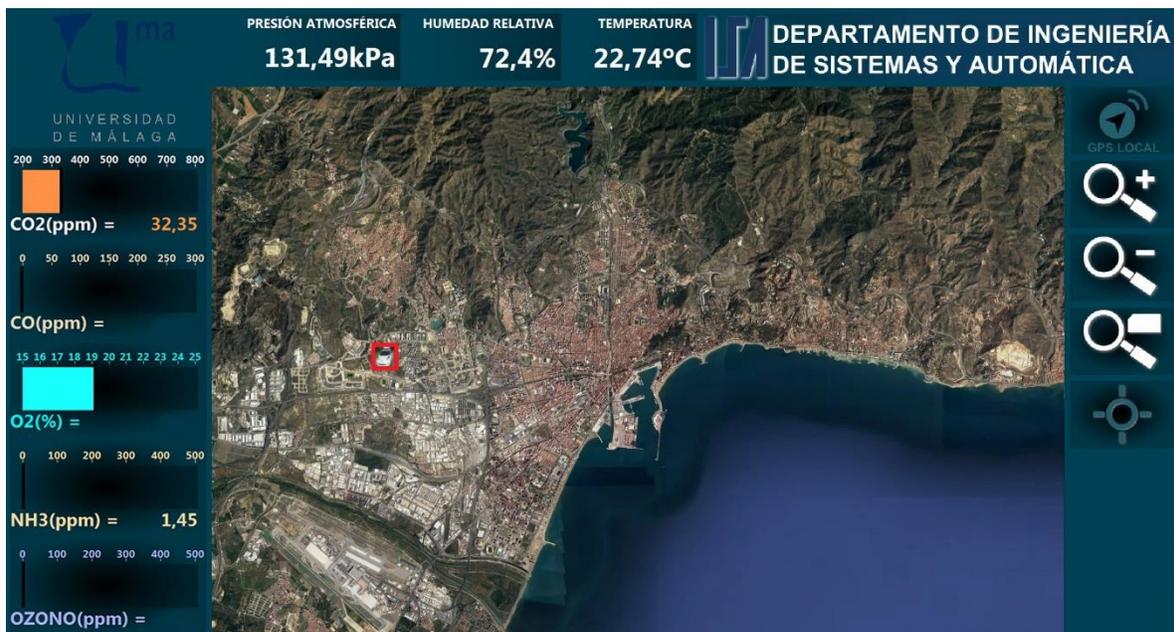


Figura 3.16. Interfaz hombre-máquina para el sistema de información urbana.

Los datos recopilados de los nodos transmisores se presentan al usuario asociados a sus ubicaciones. En el caso del nodo móvil, esta ubicación es dinámica, pero desde el punto de vista del WSN se presenta como otro nodo. El HMI ha sido diseñado para ser compatible con tabletas que operan a la intemperie que ejecutan Windows 7. De esta manera, los usuarios también pueden moverse, ya sea con el nodo móvil o en otro vehículo.

El nodo móvil ha sido diseñado para aceptar tantos tipos de nodos de transmisor como sea posible, sin modificaciones en el hardware. El nodo móvil proporciona una interfaz con la

red, a través de un nodo coordinador adicional, y una fuente de alimentación mediante un banco de baterías. Aunque todavía es posible el suministro de energía por paneles fotovoltaicos, dependiendo de la aplicación, puede no ser práctico. Hay un nodo láser, pero hasta ahora no se ha integrado al nodo móvil. Esta flexibilidad en la configuración del conjunto de sensores permite la adaptación a otras aplicaciones mediante la modificación del conjunto de sensores y la selección de la plataforma para transportar el nodo móvil, permitiendo esfuerzos de colaboración hacia un Sistema Ciber-Físico donde se puede experimentar integrando sensores, vehículos o humanos. Por ejemplo, las aplicaciones de búsqueda y rescate presentan oportunidades para este enfoque [72].

Capítulo 4. Redes de sensores inalámbricos de largo alcance: LoRa.

4.1. Introducción.

Como contrapunto a las redes de corto alcance basadas en ZigBee, que se presentaron en el capítulo anterior, en esta tesis se ha seleccionado LoRa (*Long Range*) como una alternativa para la implementación de redes inalámbricas de largo alcance.

LoRa es una tecnología inalámbrica, definida a través de la capa física de una red LPWAN. Fue propuesta por *Semtech corporation* [55], y su desarrollo y evolución está a cargo de LoRa Alliance [92]. Su propósito es comunicar dispositivos punto a punto a grandes distancias y con bajo consumo de energía. Utiliza la técnica de espectro ensanchado y su frecuencia de transferencia de datos varía de acuerdo a la región geográfica en la que se despliega.

Para el acceso a la capa física, LoRa utiliza el protocolo de red LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*), que permite administrar y comunicar los dispositivos LoRa estableciendo conexiones inalámbricas bidireccionales seguras, móviles y de bajo costo. La arquitectura de la red es en estrella, que permite un menor consumo de energía de las baterías en redes de largo alcance [93].

La red contará con varios concentradores estáticos distribuidos por la zona de interés, que recibirán los datos de diversos tipos de nodos sensores. Se ha diseñado e implementado esta red en el entorno urbano de la ciudad de Málaga. A diferencia de la red ZigBee, se ha implementado un nodo móvil con objeto de obtener más información acerca del comportamiento de los nodos sensores y concentradores. Para ello, se ha montado un conjunto de nodos sensores en un vehículo eléctrico que ha recorrido el entorno cubierto por los concentradores, obteniéndose información que ha permitido caracterizar el

comportamiento de la red sin necesitar un despliegue intensivo de nodos sensores estáticos. Toda la información obtenida se almacena en una base de datos, desde donde puede tomarse información para su representación gráfica.

4.2. Protocolo LoRa.

LoRa es una tecnología inalámbrica de RF (*radio frequency*, modulación de radio frecuencia), para redes de área amplia y baja potencia LWPAN (*Low Power Wide Area Network*) [94], creada por *Semtech Corporation* [95]. Un concentrador envía paquetes de datos a un receptor con una velocidad entre 0.3 kb/s y 5.5 kb/s. Está diseñado para largas distancias, las especificaciones prometen hasta 5 km en áreas urbanas y hasta 15 km en áreas rurales. Para administrar y comunicar los dispositivos LoRa se usa el protocolo LoRaWAN [96], que es la capa de acceso al medio de la red LoRa [97].

Opera en la banda ISM [98], que tiene frecuencias diferentes en función del área geográfica. En Europa es 868 MHz, y en América del Norte, 915 MHz, la misma utilizada en Colombia [99]. La seguridad se garantiza mediante el algoritmo AES128, tanto para cifrado como para firma de mensajes, proporcionando confidencialidad e integridad [100].

La arquitectura de la red LoRaWAN utiliza una topología de redes en estrella. Cada nodo final se comunica con varias puertas de enlace que a su vez se comunican con el servidor de red [101]. En la Tabla 4.1 se muestran algunas características del protocolo LoRa para Europa y América del Norte [102].

Tabla 4.1. Características del protocolo LoRa para Europa y América del Norte (adaptada de [102]).

	Europa	América del Norte
Banda de frecuencia	867-869 MHz	902-928 MHz
Canales	10	64 + 8 + 8
Canal banda ancha ascendente	125/250 kHz	125/500 kHz
Canal banda ancha descendente	125 kHz	500 kHz
Tx encendido	+14 dBm	+20 dBm típ (+30 dBm permitidos)
Tx desconectar	+14 dBm	+27 dBm
SF Up	7 -- 12	7 --10
Velocidad de datos	250 bps - 50 kbps	980 bps - 21.9 kbps
Link Budget Up	155 dB	154 dB
Link Budget Dn	155 dB	157 dB

En la Figura 4.1 se muestra el protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema de LoRaWAN. Sobre la frecuencia de la banda ISM de cada región, se aplica la modulación definida por el protocolo LoRa.



Figura 4.1. Protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema de LoRaWAN (adaptado de [103]).

4.2.1. Arquitectura de una red LoRa.

LoRaWAN se encarga de definir el protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema para la red mientras que LoRa habilita el enlace de comunicación de largo alcance a nivel físico. Para crear la red se necesita una MAC (Capa de control de acceso al medio)[104]. Como se ha mencionado en la sección anterior, la topología es de tipo estrella donde la red está compuesta por uno o varios concentradores, nodos finales, el servidor de red y el servidor de aplicación [105]. Los nodos envían datos asincrónicamente que son recibidos por varios concentradores. Los paquetes de datos se envían al servidor de red centralizado, donde se filtran los paquetes de datos duplicados, se aplican los protocolos de seguridad y se gestiona la red. Seguidamente los datos se envían a las aplicaciones que lo requieran [98].

La Figura 4.2 muestra la arquitectura de una red LoRa.

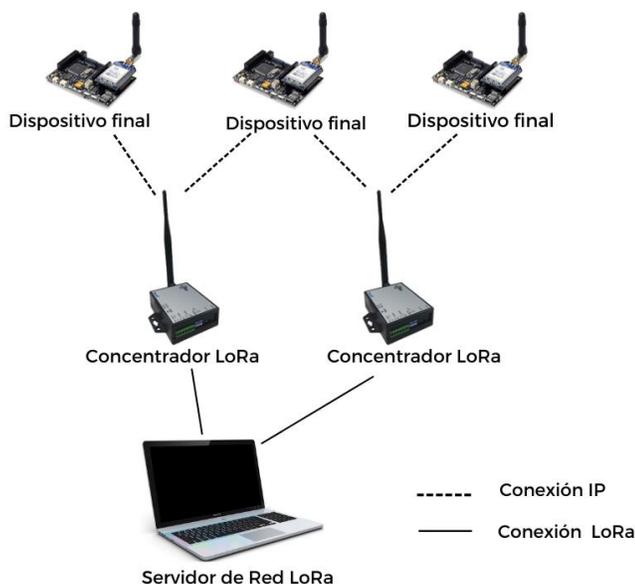


Figura 4.2. Arquitectura de una red LoRa (adaptada de [106]).

Las siguientes son algunas de la principales características de LoRa [96]:

- Topología en estrella.
- Conectividad a larga distancia.
- Sistema de encriptación con el algoritmo AES 128.

- Soporte para 3 clases de nodos.
- Permite la administración de dispositivos.
- Trabaja con redes públicas y privadas.
- Bajo consumo energético.
- Envío bidireccional de paquetes de datos.
- Largo alcance.
- Baja transferencia de datos.

En esta tesis, junto con el protocolo ZibBee ya descrito para corto alcance, se ha seleccionado LoRaWAN-LoRa como alternativa de largo alcance. De entre las características que se han mencionado, resultan particularmente relevantes el alcance, bajo consumo energético, administración de dispositivos, y fácil configuración de la red.

4.2.2. Estructura de la trama.

La trama de datos en el protocolo LoRa está compuesta por la capa física, la capa MAC y la capa de aplicación [103]. En la Figura 4. 3 se muestra la estructura de dicha trama.

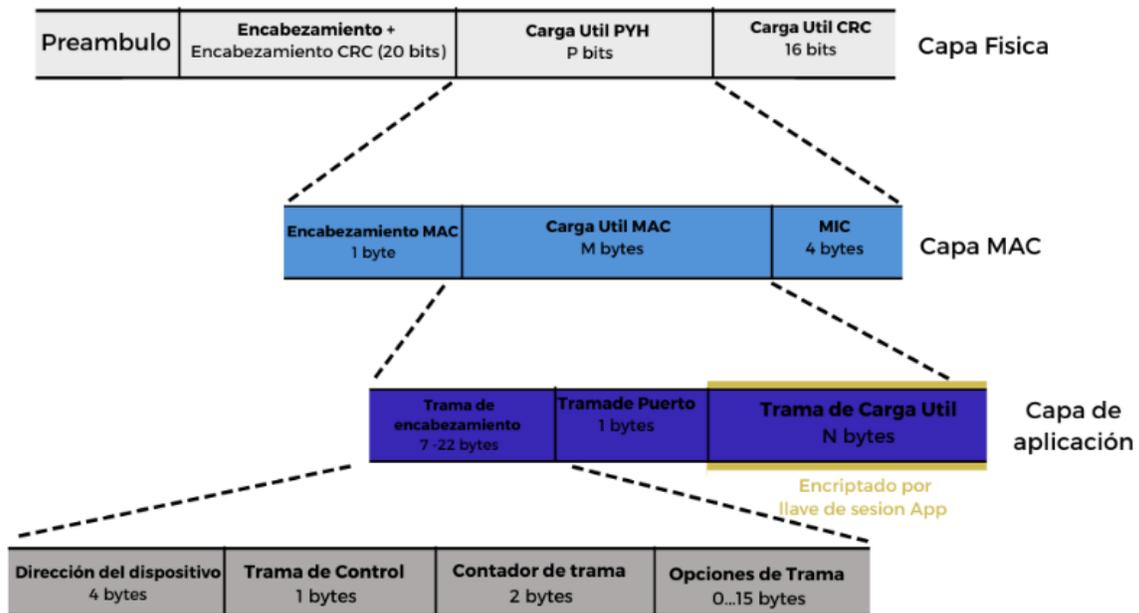


Figura 4. 3. Estructura de la trama (adaptada de [107]).

- **Trama de capa física PHY (*Physical Layer*).**

Se inicia con un preámbulo (*Preamble*), que se encarga de la sincronización y define el esquema de modulación del paquete. Seguidamente se encuentran los campos de encabezado, PHY *Payload* (o carga útil) y CRC (*Cyclic Redundancy Check*, Código de detección de errores). El campo de carga útil PHY contiene la trama de la MAC [107].

- **Trama de capa MAC.**

Está compuesta por un encabezado MAC, que se encarga de definir la versión del protocolo y el tipo de mensaje, y una carga útil, además de un campo MIC (*Message Integrity Code*, código de integridad de mensaje) calculado en base a los dos campos anteriores, y que contiene una clave de sesión de red. Éste se usa para prevenir la falsificación de mensajes y autenticar el nodo final [107]. Esta trama contiene a su vez la trama de capa de aplicación.

- **Trama de capa de aplicación.**

Se inicia con un encabezado de trama (*frame Header*). A continuación, hay un código de trama (*frame port*) que se determina según el tipo de aplicación. Por último, se completa la trama con la carga útil (*Frame payload*), cifrada con una clave de sesión de aplicación. Este cifrado se basa en el algoritmo AES 128 [107].

4.3. Elementos de Red.

Son los que permiten que se gestione la información que se obtiene de la red. Su configuración generalmente es en estrella-estrella, debido a que los nodos finales se comunican punto a punto con los concentradores. Están compuestos por el concentrador, nodos finales, servidor de red y el servidor de la aplicación [108]. El mensaje enviado por un nodo final al concentrador se conoce como un *uplink* (ascendente) mientras que si es enviado por el concentrador hacia el nodo final se conoce como mensaje *downlink* (descendente).

4.3.1. Concentrador.

Su principal función es recoger información de los nodos finales y enviarlos al servidor de red con el que se puede comunicar por distintas vías (3G, Ethernet). La comunicación con

los nodos finales la realiza con LoRa [109]. Los concentradores siempre están despiertos. [110].

4.3.2. Nodos finales.

Su función es enviar la información a los concentradores que puede ser periódica, por petición del servidor de red, o en el momento en el que se produzca algún cambio en la variable medida [96].

Existen tres clases dependiendo del momento en que pueden recibir mensajes del servidor a través del concentrador:

- **Clase A.**

Solo puede recibir un mensaje descendente (*downlink*) cuando han enviado un mensaje de enlace ascendente (*uplink*). Si hay un mensaje disponible en el servidor debe esperar hasta la hora programada de enlace ascendente [109]. Cuando se envía un paquete de datos se abren dos ventanas de recepción: una un segundo después de la transmisión y otra un segundo después de abrirse la primera, permitiendo recibir un paquete de vuelta que contiene el ACK (confirmación) del paquete enviado, así como datos de la aplicación si es necesario. Son asíncronos y los de menor consumo energético [20].

- **Clase B.**

Es una extensión de la Clase A. Tienen ventanas de recepción (*downlink*) adicionales desde el servidor a unas horas programadas. Recibe una señal temporizada del concentrador que permite al servidor identificar cuando el nodo final está escuchando [109].

- **Clase C.**

Permanecen en modo recepción. Reciben datos (*downlink*) en cualquier momento, excepto cuando están enviando. Son recomendables cuando se prioriza la recepción frente a la transmisión. Tiene mejores tiempos de respuesta y capacidad de envío que las otras dos clases, pero a costa de un mayor consumo energético [92].

En la Figura 4.4 se muestra la relación entre la latencia y la duración de la batería para las diferentes clases de nodos finales. En esta tesis se usan nodos de clase A, debido a su mayor ahorro energético.



Figura 4.4. Relación entre la latencia y la duración de la batería para las diferentes clases de nodos (adaptada de [111]).

4.3.3. Servidor de red.

Gestiona y configura la red y los nodos finales. Su función es recibir y procesar la información de los nodos finales [111]. Su integración a la red se realiza por varias puertas de enlace, usando una conexión TCP/IP segura.

4.3.4. Servidor de la aplicación.

Es el encargado de recopilar los datos recibidos de los nodos finales, analizarlos y determinar las acciones del nodo final [111].

4.4. Topología de red.

LoRa trabaja con una topología en estrella de un solo salto. Los nodos finales se conectan al concentrador y éste se conecta a través de IP con el servidor de red para la transmisión de la información [101].

La topología en estrella es fácil de implementar y gestionar. No necesita enrutamiento, es segura y facilita reducir el consumo de energía de los nodos finales que se conectan con el mejor concentrador en términos de potencia de señal [98].

4.5. Seguridad de la red.

LoRaWAN implementa cifrado AES de 128 bits con dos capas independientes de seguridad: una clave de sesión de red NwkSKey (*Network Session Key*), que garantiza la seguridad a nivel de red; y una clave de aplicación AppSKey (*Application Session Key*), que garantiza la seguridad extremo a extremo a nivel de aplicación [106]. La *Application Key* solo se aplica para los accesos vía OTAA y realiza una función similar a la AppSKey [100].

La forma en la que se implementan las claves da lugar a dos modos de activación diferente: ABP (*Activation By Personalization*) y OTAA (*Over-The-Air Activation*):

- ABP: la configuración de los nodos finales se basa en una dirección física (DevAddr), que debe ser conocida por el servidor de red, y en claves de aplicación (AppSKey) y de red (NwkSKey) preprogramadas, y por tanto estáticas [105]. Los dispositivos se comunican directamente a la red, sin necesidad de un procedimiento para unirse, iniciándose la transmisión de paquetes inmediatamente.
- OTAA: se realiza una negociación de las claves de cifrado entre el dispositivo final y el servidor de red [106]. El nodo final envía el identificador del nodo (EUI *Extended unique identifier*), el identificador de la aplicación (*Application EUI*), y la clave *Application Key* al servidor. Este a su vez envía la dirección del nodo y las claves *Network Session Key* y *Application Session Key*. Cuando se cumple este proceso, se inicia la transmisión de paquetes.

4.6. Arquitectura e implementación.

La implementación de la red de sensores inalámbricos de largo alcance y baja potencia propuesta en esta tesis se basa en dispositivos comerciales y está constituida por un conjunto de concentradores estáticos distribuidos por la zona de interés. Se ha implementado un nodo móvil que permite comprobar las prestaciones de la red sin necesidad de desplegar nodos estáticos. Los paquetes de datos captados se transmiten a larga distancia con bajo consumo energético y son almacenados en una base de datos externa.

4.6.1. Arquitectura del sistema.

El sistema propuesto pretende verificar las posibilidades de una red de sensores inalámbrica basada en una tecnología de largo alcance, como LoRa, en una aplicación comparable a la que se ha usado de referencia para ZigBee en el capítulo previo. Así, el objetivo es obtener información del entorno urbano, considerando un área de interés equivalente a la estudiada para ZigBee. Se han implementado dos tipos de dispositivos: nodo final y nodo concentrador. En la Figura 4.5 se muestra la arquitectura del sistema propuesto.

El sistema tiene topología en estrella (ver sección 4.4), compuesto por varios concentradores (ver sección 4.3.1), nodos finales (ver sección 4.3.2), servidor de red (ver sección 4.3.3) y servidor de aplicación (ver sección 4.3.4).

Los nodos finales son los encargados de obtener la información del entorno, como la temperatura, humedad, presión, CO₂, NO₂, CO. Esta información se envía al servidor de red a través de los concentradores que, a su vez, envían la información al servidor de aplicación. Los datos se almacenan en una base de datos desarrollada en MySQL, desde la que es posible gestionar y administrar la información.

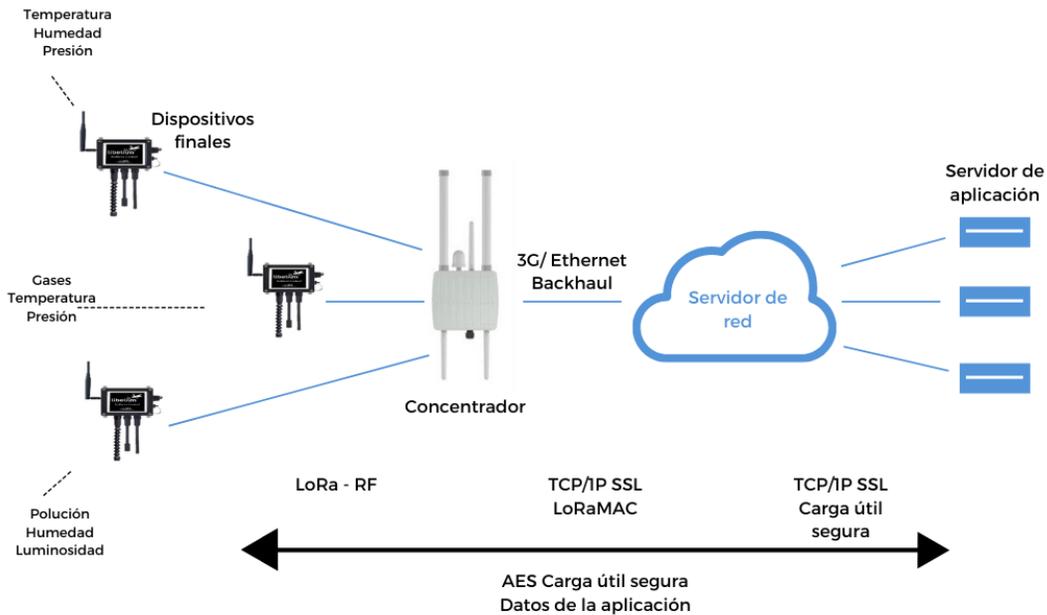


Figura 4.5 Arquitectura del sistema propuesta.

4.6.2. Implementación.

El sistema desarrollado se implementa con dispositivos adquiridos a la empresa Libelium [44]. Los nodos finales se basan en un módulo común llamado *Waspnote Plug & Sense v15*, sobre el que se instalan diferentes tipos de sensores. Los nodos finales que se usan son los de Clase A (ver sección 4.3.2) [20]. El concentrador es un *Multitech* modelo MTCDTIP-H5-220L (*Multitech Conduit*) [20], configurado para trabajar con el protocolo LoRaWAN. A través de él, los nodos finales se comunican con el servidor de red [112] que entrega los paquetes de datos al servidor de la aplicación. La administración de estos paquetes de datos se hace a través de una aplicación desarrollada específicamente. Se han implementado con dos modos de operación:

- **Offline:** La información se almacena en un fichero de texto plano en el concentrador. Este fichero puede descargarse desde cualquier dispositivo y subirse a la base de datos cuando haya una conexión de internet disponible. Este modo permite operar sin

necesidad de que los concentradores estén conectados a red. Su memoria interna (200 MB) permite la operación durante un periodo de tiempo prolongado sin riesgo de pérdida de datos. Este modo es adecuado para despliegues por tiempo limitado, como es el caso que se da en la experimentación.

- **Online:** cada concentrador está conectado a internet, con lo que directamente suben los datos recibidos a la base de datos externa, basada en MySQL. Este modo es apropiado para despliegues permanentes.

A continuación, se describen los elementos disponibles para los nodos finales, a partir de los cuales se ha definido, en cada caso, la configuración del sistema desplegado para los experimentos.

- **Control Ambiental (*Ambient Control*):** mide las variables de humedad, temperatura y luminosidad (ver Figura 4.6). Para la entrada A se usa la sonda 9370-P, que mide temperatura, presión y humedad. Para las entradas B y C se usan las sondas 9205-P y 9325-P, respectivamente que miden luminosidad [112].



Figura 4.6. Nodo final de control ambiental (adaptada de [44]).

- **Entorno inteligente PRO (*Smart Environment PRO*):** mide los gases CO₂, NO₂, O₃ y CO, además de medir polución, calidad del aire, temperatura, presión, humedad y luminosidad [112] (ver Figura 4.7).



Figura 4.7. Nodo entorno inteligente PRO (adaptada de [44]).

- **Agricultura inteligente PRO (Smart Agriculture PRO):** mide humedad, temperatura, radiación solar visible, velocidad y dirección del viento, pluviómetro, y presión atmosférica. Se usa como nodo GPS y apoyo al nodo de control ambiental [112] (ver Figura 4.8).



Figura 4.8. Nodo agricultura inteligente PRO (adaptada de [44]).

Todos los nodos finales traen una antena LoRa (868 MHz) y una antena GPS lo que posibilita conocer el valor de la magnitud medida y el lugar donde se produce este valor. Se debe tener en cuenta cuales son los parámetros a transmitir junto con la geocalización. LoRa utiliza la técnica de modulación de espectro ensanchado (*Chirp Spread Spectrum*, CSS) donde un pulso de radar de alta intensidad comprimido (*chirp*) barre las frecuencias para expandir la señal espectral [113]. Este cambia su frecuencia en función del número de bits que se quieran usar para codificar un símbolo, dependiendo del tiempo en el aire. El número de bits lo define el SF (*Spread Factor*) que es el responsable de ensanchar el espectro de frecuencia en mayor o menor medida [111]. A mayor valor de SF, mayor tiempo está el mensaje visible en el aire siendo la probabilidad de recepción mayor, pero habrá mayor consumo de batería. El SF puede tomar seis valores de propagación diferentes de 7 a 12 [114]. En la Tabla 4.2 se observa que con SF 7 se transmite a mayor velocidad, pero se necesita mayor potencia mientras que con un SF 12 se transmite a menor velocidad con un consumo menor.

Tabla 4.2 Tasa de transferencia con ancho de banda constante para los Spread Factor (adaptada de [119]).

SF	Tasa de bit a banda ancha constante BW (kb/s)	Sensibilidad (dBm)
12	5.468	-123
11	3.125	-126
10	1.757	-129
9	0.976	-132
8	0.537	-134,5
7	0.293	-137

4.6.3. Nodo Móvil.

Se ha implementado un nodo móvil compuesto por un concentrador y varios nodos transmisores inalámbricos. Se pretende probar la funcionalidad de la red LoRa en el entorno urbano de la ciudad de Málaga comprobando la cobertura de los concentradores estáticos desplegados por varias ubicaciones de la ciudad.

El nodo móvil se ha instalado en un vehículo eléctrico que recorre una ruta definida que pasa por las zonas de despliegue de los nodos estáticos. A diferencia de la red de corto alcance implementada en ZigBee, donde el propósito del nodo móvil es recolectar información del medio urbano por donde se despliega, lo que se pretende ahora es comprobar la recepción de los paquetes emitidos por los nodos transmisores del vehículo en los distintos concentradores estáticos y comparar dicha recepción respecto al concentrador que va embarcado en el nodo móvil que dada la poca distancia de los dispositivos de la red en el nodo móvil garantiza la recepción de todos los paquetes de datos emitidos. Esto permitirá conocer las zonas donde hay una mayor cobertura de los concentradores.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Capítulo 5. Experimentos.

5.1. Introducción.

En este capítulo se hace una descripción de los experimentos realizados para validar el funcionamiento de las redes de sensores propuestas. Se han desarrollado tanto para la red de corto como para la de largo alcance.

La red de corto alcance se basa en el protocolo ZigBee. Se ha partido de una red de sensores inalámbrica estática denominada UIS. Para ampliar la zona estudiada por la red, se ha desplegado un nodo móvil a bordo de un vehículo eléctrico, dando lugar a una red híbrida. Se usan dos modos de trabajo, modo local y modo en red, en función del modo en que se gestionan los datos en el coordinador para su transmisión a la base de datos externa. Se han llevado a cabo experimentos con ambos modos de funcionamiento en el entorno de la ciudad de Málaga.

La red de largo alcance se ha basado en el protocolo LoRaWAN. La red propuesta se ha conformado mediante varios concentradores estáticos desplegados en diferentes sitios de la ciudad de Málaga, de manera que el área estudiada fuera comparable con la de los experimentos de la red ZigBee. Para los experimentos también se ha contado con un nodo móvil, pero su objeto es diferente. En lugar de usarse para ampliar la zona de estudio de la red, aquí se ha empleado para verificar las prestaciones de la red sin necesidad de hacer un despliegue masivo de nodos sensores estáticos. Así, se ha embarcado un conjunto de sensores en un vehículo eléctrico, junto con un concentrador adicional para verificar la recepción y almacenamiento de todos los datos obtenidos en la ruta.

Las dos redes de sensores implementadas han permitido recoger datos en el entorno urbano de la ciudad de Málaga, presentando diversas particularidades que se discuten en este capítulo.

5.2. Experimentos con la red de corto alcance.

Para la validación de la red de corto alcance se ha diseñado una serie de experimentos. En estos experimentos se desplegó la red con el propósito de obtener datos en una zona geográfica amplia en un entorno urbano de la ciudad de Málaga. Como se ha descrito, se trata de una red flexible, que permite adicionar fácilmente nodos sensores. Los nodos, por su tamaño, peso y autonomía energética, se pueden desplegar con gran facilidad en el área de interés. Estas características confieren a la red un alto potencial para integrarse en sistemas autónomos. Para validar el sistema se han empleado diferentes combinaciones de nodos y sensores. Entre los que tenemos un nodo coordinador, nodo gases y un nodo EP (*Smart City*) que puede censar información como luminancia, polvo y ruido.

El principal objetivo de la validación es mostrar la capacidad de una red híbrida como la descrita en el Capítulo 3 para cubrir un área geográfica amplia basándose en una red de corto alcance como es ZigBee, lo que constituye la principal aportación de esta tesis. Para ello se ha configurado un nodo móvil a bordo de un vehículo de prueba. Este nodo móvil estaba constituido por una red compuesta por un nodo coordinador, y varios nodos sensores, instalados en un contenedor en el techo del vehículo.

Los experimentos se realizaron para los dos modos de trabajo: local y en red. Estos dos modos de trabajo se han desarrollado con la estrategia de un nodo móvil, la red se instaló en el portador superior modificado de un vehículo de prueba. El vehículo de prueba seleccionado es un automóvil eléctrico de pasajeros (Nissan Leaf) para evitar la perturbación de las mediciones de gas y ruido (ver Figura 5.1).

Los experimentos consistieron en una serie de rutas a lo largo de la ciudad de Málaga, en España. Una de las rutas inicia en la escuela de Ingenierías, en el Campus de la Universidad de Málaga (UMA), luego se sigue hacia el Este, pasando por el centro histórico, hasta llegar a la barriada de El Palo, en el límite oriental de la ciudad, para finalmente regresar al punto de partida en el Campus. También se completaron otras rutas más cortas, en el entorno del centro histórico de la ciudad. El nodo coordinador dentro del nodo móvil actualizaba su base de datos interna a partir de la información obtenida por los nodos sensores, y la sincronizaba con la base de datos de en un servidor externo. Una interfaz HMI, que se ejecutaba en una

computadora portátil, permitió monitorear en tiempo real los datos recopilados relacionados con su posición geográfica.



Figura 5.1 Vehículo utilizado en experimentos. Se muestra el contenedor empleado para portar los elementos del nodo móvil.

5.2.1. Modo local.

En este modo de operación se tiene un nodo coordinador, encargado de recibir la información de los nodos transmisores, que se conectan al nodo coordinador y envían la información que recogen los sensores del entorno urbano. En este modo para crear una trama el nodo coordinador debe haber recibido los datos de todos los sensores. Debido a esto la adquisición de datos está limitada por la dinámica del sensor más lento de la red.

En estos experimentos, el nodo móvil se configuró alrededor de los nodos de gas y EP. El sensor de gas incluye varios sensores para las concentraciones de varios gases y los parámetros ambientales. Proporciona así mediciones para la concentración de O₂, CO₂, y

VOC, además de temperatura, humedad, polvo, luminancia y ruido. Los datos del GPS se obtuvieron del nodo coordinador.

En el modo de funcionamiento local los nodos de gas y EP integrados adquieren y procesan los datos respectivos, y los envían al nodo coordinador embarcado en el vehículo. Una vez que todos los sensores han proporcionado datos, se completa un conjunto y se agrega localización a través del GPS del nodo coordinador para dar lugar a una trama mejorada. La base de datos interna se actualiza y sincroniza con la base de datos externa en el servidor.

Los experimentos consistieron en desplegar el vehículo de prueba a lo largo de varias rutas en la ciudad de Málaga. La Figura 5.2 muestra una captura de pantalla de la HMI al final de una de las rutas en el centro de la ciudad. El camino seguido se ha señalado con una línea roja. Se han agregado etiquetas numéricas para marcar las ubicaciones donde se completó un marco mejorado de acuerdo con el modo de trabajo local. Este experimento en particular tuvo una longitud de 5 km y tardó 47 minutos en completarse.



Figura 5.2. Área del centro de la ciudad cubierta por experimentos en modo local.

La Tabla 5.1 presenta los datos recopilados para la ruta mostrada en la Figura 5.2 El número del ítem coincide con las etiquetas en la figura mencionada anteriormente. Como se ha explicado, en el modo local, se construye una trama mejorada una vez que se adquieren los

datos de todos los nodos presentes, anexando los datos GPS proporcionados por el nodo coordinador. Por lo tanto, cada fila de esta tabla muestra los datos recopilados hasta esa ubicación. Esta estrategia produce tantas tramas como haya producido el sensor instalado más lento. En este experimento particular, los límites fueron impuestos por la dinámica del sensor de CO₂. Esto se puede notar en la Figura 5.2, donde las ubicaciones para las tramas 1 a 4 están más cerca que para las tramas 4 a 7, porque el vehículo de prueba podría moverse a una velocidad más lenta en ese tramo, debido a atascos de tráfico. Los resultados preliminares de este modo de trabajo se describieron en [87].

Tabla 5.1. Datos obtenidos para una ruta del centro de la ciudad en modo local.

Ítem	Nodo EP			Nodo de Gas					Coordenadas GPS
	Luminancia (lux)	Polvo (ppm)	Ruido (dB)	Temp (°C)	Humedad (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (ppm)	VOC (ppm)	
1	25.0	0.074	83	24.00	43.7	19.585	334.300	6.05	36.723861, - 4.426139
2	97.0	0.075	93	25.81	47.6	17.794	334.490	5.25	36.717833, - 4.426333
3	97.5	0.082	94	23.55	53.2	17.843	334.951	8.69	36.721444, - 4.425111
4	98.0	0.074	91	27.10	42.1	18.569	334.615	8.46	36.723722, - 4.422750
5	98.5	0.074	91	25.32	51.1	18.133	334.793	7.64	36.721278, - 4.413306
6	75.2	0.072	93	27.85	44.3	18.952	334.713	7.94	36.716861, - 4.427944
7	98.6	0.074	93	26.29	50.0	18.423	334.694	8.13	36.719722, - 4.435972

5.2.2. Modo en red.

Para este modo de trabajo la red cuenta igualmente con un nodo coordinador y un conjunto de nodos sensores. La diferencia radica en la construcción de la trama mejorada, que se completa a partir de la llegada de información de cualquier nodo sensor.

En los experimentos para el modo en red, el nodo móvil se configuró para incluir un nodo GPS y un nodo sensor de gases. Los sensores de gases empleados incluían NH_3 , O_2 , CO_2 , VOC, así como temperatura, presión atmosférica y humedad.

De acuerdo con el funcionamiento de este modo en red, los nodos de gases y GPS adquieren, procesan y envían datos al nodo coordinador embarcado de acuerdo con su propia dinámica. Al recibir los datos de cualquier sensor, el nodo coordinador actualiza su base de datos interna y la sincroniza con la base de datos externa en el servidor. Los datos del GPS se trataron como otro sensor, actualizando la ubicación en la base de datos tan pronto como se recibieron nuevos datos de acuerdo con una velocidad programada.

Los experimentos fueron diseñados para considerar una mayor diversidad en las rutas, incluyendo carreteras y distancias más largas, pero igualmente en la ciudad de Málaga. La Figura 5.3 presenta una captura de pantalla de la HMI que muestra la ruta de uno de estos experimentos, así como etiquetas para las ubicaciones seleccionadas. El camino comenzó en el Campus de Teatinos de la Universidad de Málaga (cuadrado rojo) y llegó al límite Este de la ciudad (etiqueta 6) para finalmente regresar al Campus. Esta ruta se realizó en 1 hora y 24 minutos, para un total de 28.3 kilómetros que cubren carreteras en la parte occidental de la ruta (etiquetas 1 y 2), así como áreas urbanas para el resto. El número de paquetes que se obtuvieron en esta ruta fue 136. La Tabla 5.2 presenta algunos de los datos obtenidos por el nodo móvil, junto con las etiquetas ubicadas geográficamente en la ruta marcada en la Figura 5.3. Las mediciones registradas por los diferentes sensores se mostraron en tiempo real en el HMI, lo que permitía al usuario visualizar un gráfico con la evolución de un sensor determinado seleccionándolo en la interfaz. La Figura 5.4 muestra la evolución de las mediciones obtenidas por el sensor NH_3 a lo largo de la ruta cubierta por los experimentos.

A diferencia del modo local, en el modo en red, la estrategia permite adquirir una mayor cantidad de datos. La actualización y sincronización de las bases de datos se lleva a cabo cada vez que un sensor obtiene datos nuevos. Por lo tanto, la dinámica lenta de un sensor no limita la obtención de más datos con uno más rápido. De esta manera, la Tabla 5.2 presenta un resumen de los datos, mientras que en el Apéndice A se presenta un conjunto más extenso de mediciones. La Tabla 5.2 presenta los últimos datos obtenidos para cada sensor cuando el auto de prueba llegó a las ubicaciones etiquetadas en la Figura 5.3.



Figura 5.3 Área de la ciudad de Málaga cubierta por experimentos en modo en red.

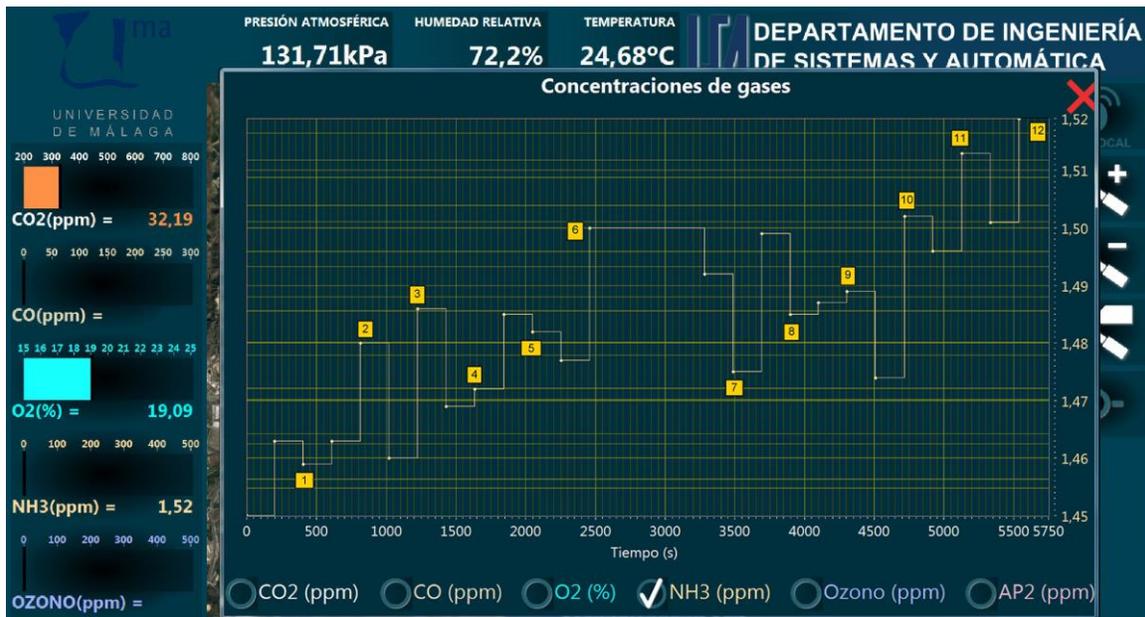


Figura 5.4 Mediciones para el sensor NH3 obtenidas en un experimento en modo de red, como se muestra en la interfaz de usuario.

Tabla 5.2 Resumen de los datos obtenidos por el nodo Móvil en una ruta en la ciudad de Málaga, trabajando en modo en red.

Item	NH ₃ (ppm)	Temp (°C)	Humedad (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (ppm)	PA (kPa)	VOC (ppm)	Coordenadas
1	1,459	24,19	68,2	18,89	332,3	131,4	2,058	36.719452;- 4.484610
2	1,48	22,9	77,4	19,28	332,2	131,8	1,464	36.716583;- 4.439668
3	1,486	23,06	77,4	19,18	332,3	132,4	1,598	36.715145;- 4.422010
4	1,472	21,94	78,8	19,18	332,2	132	1,428	36.721134;- 4.407420
5	1,482	22,74	76,1	19,28	331,4	132,1	2,999	36.721664;- 4.384402
6	1,5	23,39	74,1	19,18	332,2	132	1,428	36.720882;- 4.356973
7	1,475	24,03	71,5	18,79	332,1	132,1	1,762	36.720276;- 4.349758
8	1,485	26,13	70,7	18,5	332,2	132,2	1,849	36.720242;- 4.349797
9	1,489	23,55	71	19,18	332,2	132,2	1,273	36.722378;- 4.367095
10	1,502	23,71	74,3	19,09	332,1	132	1,784	36.721573;- 4.404797
11	1,513	25,48	71,5	18,89	332	132,4	1,017	36.716644;- 4.428792
12	1,519	24,68	72,2	19,09	332,2	131,7	1,103	36.719795;- 4.485310

5.3. Experimentos con la red de largo alcance.

Con objeto de facilitar la comparación con la red basada en una tecnología de corto alcance ya descrita, en este apartado se presenta una implementación alternativa basada en una tecnología de largo alcance, como es LoRa. El propósito de esta red es igualmente proporcionar información de un área geográfica extensa, particularizando en el entorno urbano de la ciudad de Málaga, para facilitar la comparación con la red de corto alcance. Esta nueva red, al estar basada en una tecnología pensada para obtener mayor alcance, está configurada de un modo diferente. Se han desplegado cuatro concentradores estáticos en diferentes sitios de la ciudad, que cubren la misma ruta que se usó para la red de corto alcance con ZigBee. En este caso también se cuenta con un nodo móvil, pero su propósito es facilitar

la realización de los experimentos, en lugar de formar parte del planteamiento de la red. Este nodo móvil permite comprobar la transmisión por parte de los nodos sensores desde distintas localizaciones, sin la necesidad de hacer un despliegue extenso de nodos por toda la ciudad. Para ello se ha configurado un nodo móvil con un conjunto de diversos nodos finales, así como un concentrador adicional, también a bordo del vehículo. Gracias a este último elemento, es posible comparar los datos de los concentradores estáticos con los datos del concentrador del nodo móvil y de esta manera determinar la cobertura de la red desplegada.

Esta red se ha puesto a prueba en una serie de experimentos diseñados para facilitar la comparación con la red de corto alcance. Se ha configurado la red de manera que pueda contar con cinco concentradores: cuatro estáticos y uno a bordo del nodo móvil. Los nodos finales, con sensores, se han desplegado exclusivamente en el nodo móvil. Al igual que en el caso de los experimentos con la red basada en ZigBee, el nodo móvil se ha instalado en un vehículo eléctrico Nissan Leaf, para evitar perturbaciones en las medidas. En la Figura 5.5 se muestra el vehículo con los nodos sensores en su baka. Asimismo, las rutas que siguió el vehículo se planificaron para que fueran también similares a las de los experimentos con la red de corto alcance.

La red se configuró en modo *Activation By Personalization (ABP)*, ya que permite que los paquetes enviados por los nodos finales se reciban en múltiples concentradores. De este modo, la información obtenida por los sensores se transmitía a todos los concentradores desplegados, que a su vez la enviaban al servidor red (*LoRa Network Server*). Este a su vez enviaba el paquete de datos al servidor web (*phpMyAdmin*), que contiene la base de datos de MySQL.

Para los experimentos se configuró el SF con valores altos (de 9 a 12), para obtener una mejor penetración en el entorno urbano. Esto permite tener una mayor cobertura en la zona censada con los concentradores estáticos, ya que los paquetes de datos con SF altos presentan una mejor respuesta en zonas con obstáculos e interferencias.



Figura 5.5 Nissan Leaf con los nodos sensores en su baca.

Se desplegaron cuatro nodos concentradores en varios sitios estratégicos de la ciudad de Málaga. Los emplazamientos se escogieron buscando cubrir un área equivalente a la de los experimentos desarrollados con la red ZigBee, y teniendo en cuenta la posibilidad del acceso para la instalación y uso de los equipos. De este modo, los emplazamientos seleccionados fueron:

- Edificio de la nave taller-Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga (zona Oeste de la ciudad).
- Facultad de Turismo (zona Oeste, a dos kilómetros al este del primer sitio).
- Pabellón de Gobierno, situado en el Ejido (centro de la ciudad, en una zona elevada).
- Centro Internacional Español, en el sector de El Palo (zona Este).

Además, se incluyó un quinto concentrador montado en el vehículo eléctrico, con el propósito de recolectar todos los paquetes enviados por los nodos finales, sirviendo como control del experimento. Los cinco concentradores deben recoger todos los paquetes de los nodos finales. En este experimento se usaron dos nodos de control ambiental, incluyendo

sensores de temperatura, presión, humedad y GPS. En la Figura 5.6 se muestran los puntos donde se ubicaron los concentradores.

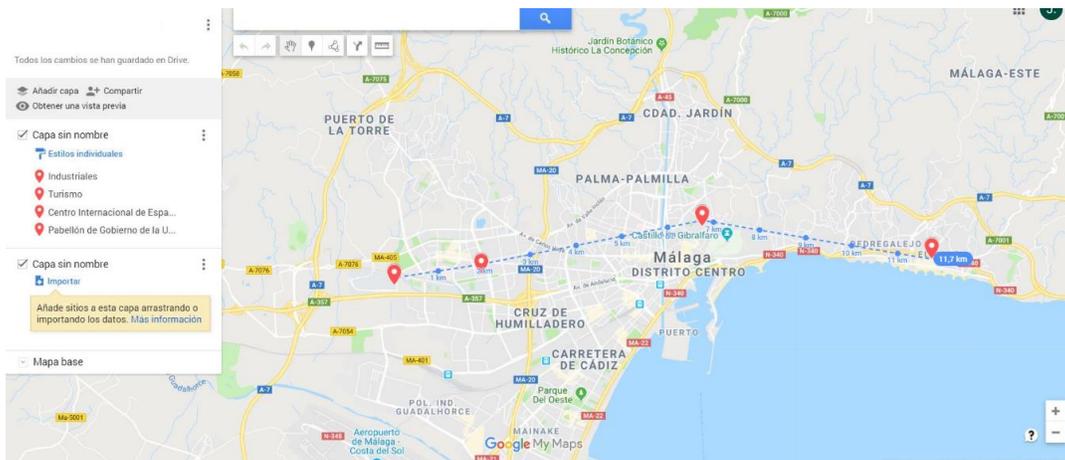


Figura 5.6 Puntos escogidos para los nodos concentradores en la ciudad de Málaga.

El objetivo final del experimento es probar la capacidad para transmitir datos de una red basada en tecnología de largo alcance, para facilitar la comparación con la red híbrida propuesta basada en ZigBee, e ilustrar las capacidades de esta última. De acuerdo con ello, se plantearon diversas rutas en las mismas zonas que las recorridas en los experimentos con la red basada en ZigBee.

A continuación, se describe uno de estos experimentos, seleccionado por ser característico de la serie. La ruta recorrida inicia en la Escuela de Ingenierías Industriales de la UMA (primer concentrador). Luego se va hacia la Facultad de Turismo (segundo concentrador). Se recorre la Avenida Andalucía en dirección centro hasta llegar al El Ejido (tercer concentrador). Finalmente se recorre por Los Baños del Carmen hasta llegar a El Palo (cuarto concentrador). Este recorrido se hace de ida y vuelta.

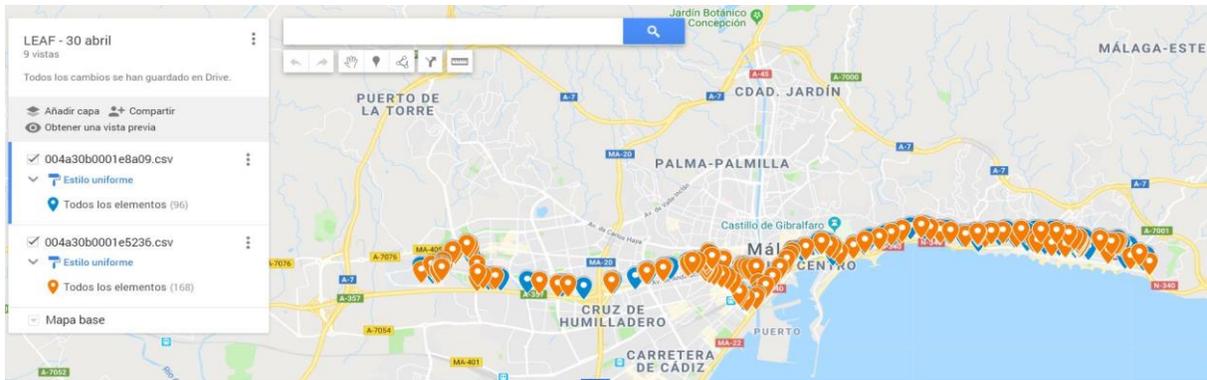


Figura 5.7 Recorrido del vehículo en la ciudad de Málaga.

En la Figura 5.7 se muestra el recorrido realizado por el vehículo. Estas geolocalizaciones se obtuvieron de los nodos finales con GPS, y que están en la baca. El número de paquetes que se obtuvieron en esta ruta fue 554.

En la Tabla 5.3 se muestran algunos datos de humedad, presión y temperatura obtenidos en esta ruta.

Los paquetes de datos obtenidos se procesan en una aplicación dentro de los concentradores, y son exportados a una base de datos externa. Así mismo estos datos pueden ser exportados a otras aplicaciones como, por ejemplo, My Maps de Google. De este modo pueden verse los datos y la ubicación donde se obtuvieron. A continuación, se presentan algunas figuras con información obtenida de los experimentos.

Tabla 5. 3 Resumen de datos obtenidos en la ruta.

id	Humedad (%)	Presión Pascal	Temp (°C)	ALT	LAT	LON	timestamp
1	53.9	101268	22.15	-48.5	367.163	-449.435	30/04/2019 09:43
2	53.7	101301	22.02	48.3	367.149	-449.091	30/04/2019 09:53
3	53.2	101295	22.14	60.2	367.151	-449.191	30/04/2019 09:53
4	51.3	101219	22.29		36.716	-449.443	30/04/2019 09:53
5	52.1	101220	22.31	58	367.162	-449.167	30/04/2019 09:54
6	51.6	101217	22.16	55.6	367.168	-448.982	30/04/2019 09:55
7	52.3	101190	22.05	67.6	367.186	-448.791	30/04/2019 09:55
8	53.5	101166	21.92	60.6	367.195	-448.459	30/04/2019 09:56
9	54.7	101227	21.89	101	367.181	-448.417	30/04/2019 09:56
10	53.8	101302	21.83	39.1	367.165	-448.305	30/04/2019 09:56
11	54.4	101241	21.81	52.3	367.141	-448.321	30/04/2019 09:57
12	53.8	101338	21.84	53.8	36.714	-448.066	30/04/2019 09:57
13	53.6	101372	21.85	52	367.139	-447.814	30/04/2019 09:58
14	53.9	101266	21.86	53	367.135	-447.284	30/04/2019 09:58
15	55	101328	21.76	47.7	367.128	-446.589	30/04/2019 09:59
16	55.3	101338	21.71	41.6	367.124	-446.149	30/04/2019 09:59
17	55.4	101446	21.67	41.4	367.134	-445.539	30/04/2019 10:00
18	55.6	101534	21.68	75.2	367.142	-445.101	30/04/2019 10:00
19	55.3	101542	21.73	24.6	36.715	-444.828	30/04/2019 10:01
20	57.1	101582	21.71	43.6	367.159	-444.391	30/04/2019 10:01
21	57.4	101643	21.71	14.8	367.166	-44.403	30/04/2019 10:02
22	57.1	101640	21.87	63.2	367.163	-444.051	30/04/2019 10:02
23	55.1	101773	22.46	-48.5	367.114	-442.638	30/04/2019 10:08
24	54.8	101776	22.43	19.9	367.118	-442.578	30/04/2019 10:08
25	54.6	101791	22.45	28	36.712	-4.425	30/04/2019 10:09

En la Figura 5.8 se muestran los datos recibidos por cada concentrador estático desde los nodos finales embarcados en el vehículo eléctrico. En la Figura 5.9 se ve la cobertura del concentrador que se encuentra en el Pabellón de Gobierno, en El Ejido. El alcance de este concentrador es muy bueno, con un radio de 5 km, lo que indica que es una excelente ubicación.

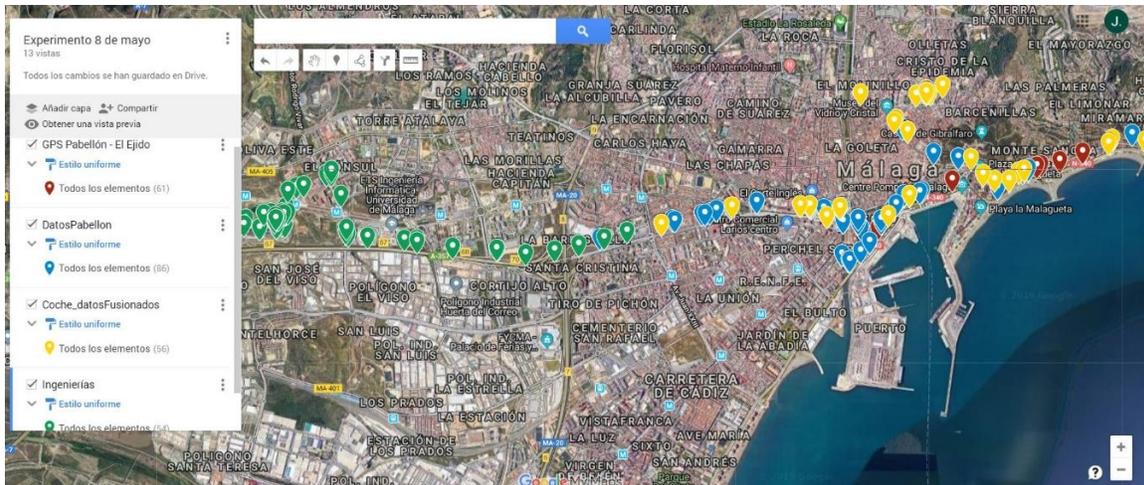


Figura 5.8 Datos recibidos por cada concentrador geocalizados en la ciudad de Málaga (Google 2019).



Figura 5.9 Paquetes de datos recogidos desde el Pabellón de Gobierno En el Ejido (Google 2019).

En la Figura 5.10 se presentan datos fusionados de dos tablas del experimento urbano. Además, se obtiene un paquete de datos de más de 6 km. Esto debido a la visión directa de las antenas.

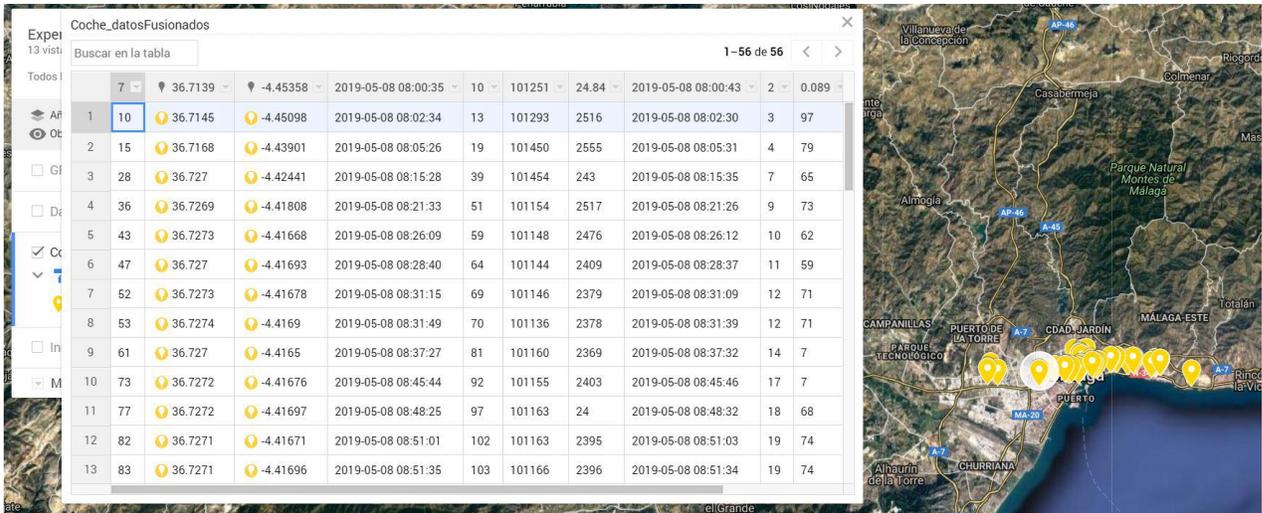


Figura 5.10 Tablas combinadas del experimento urbano.

5.4. Análisis y discusión.

En esta tesis se implementan dos redes de sensores inalámbricas:

- Una red basada en una tecnología de corto alcance, con el protocolo ZigBee, y que cuenta con una arquitectura híbrida para ampliar sus capacidades, principal contribución de esta tesis
- Una red de largo alcance basada en el protocolo LoRa, que permite comparar y contrastar las prestaciones obtenidas con la red basada en ZigBee.

La red basada en ZigBee evolucionó a partir de una red estática existente. Se diseñó una nueva arquitectura que transformó la red en híbrida (H-WSN), incluyendo el diseño y la implementación de un nodo móvil modular, capaz de usar diferentes sensores de acuerdo con las necesidades de la misión. Contar con este nodo móvil aporta flexibilidad y alcance a la red, en comparación con otros trabajos [33], donde la red es estática y de poca cobertura. La arquitectura de la red ha permitido, a través de la integración del nodo móvil, evitar la necesidad de enrutamiento de múltiples saltos, en otras investigaciones como [5], se comunican los nodos transmisores entre ellos, para mejorar la comunicación, lo que puede reducir la vida útil de los nodos debido a una mayor comunicación, además de la exigencia de desplegar un elevado número de nodos para cubrir un área amplia. Se han desarrollado dos modos de integración diferentes para la información procedente de los sensores: modo

local (ver sección 5.2.1) y modo en red (ver sección 5.2.2). Se desarrollaron una serie de experimentos que se centran en un nodo móvil. Los datos recopilados con el nodo móvil se presentaban al usuario en tiempo real, mediante una interfaz persona-máquina, en contraprestación a esto en otros trabajos como [7][15], no se desarrolla una HMI donde se visualizan los datos recolectados en tiempo real.

Finalmente, las pruebas abarcaron ambos modos de trabajo: local y en red. En modo local, la base de datos se actualiza sólo después de que todos los nodos de transmisores de la red hayan enviado sus datos. La dinámica del nodo móvil queda dictada por la del nodo más lento.

Los resultados con el modo local mostraron una cantidad limitada de datos, como se esperaba. En particular, la dinámica lenta del sensor de CO₂ produjo una baja tasa de nuevos datos que llegan a la base de datos externa y luego a la interfaz de usuario.

En el modo en red, se realiza una actualización de la base de datos cada vez que un nodo transmisor captura datos y los envía al nodo coordinador. Esta estrategia permite la adquisición de una mayor cantidad de datos, como lo demuestran los experimentos realizados.

La arquitectura de la red es lo suficientemente flexible como para cambiar fácilmente la cantidad y el tipo de sensores. Los experimentos se han realizado con diferentes conjuntos de sensores, que se integran a la red sin ningún problema de compatibilidad. El diseño modular del nodo móvil permite una fácil reconfiguración. Su flexibilidad facilita su adaptación a otros casos de uso, como por ejemplo misiones de búsqueda y rescate. La red de corto alcance es más versátil para misiones cambian rápidamente, otras aplicaciones desarrolladas en investigaciones, como por ejemplo en [30][34], son para una aplicación específica, lo que limita la flexibilidad de la red.

El sistema propuesto proporciona un vehículo con un conjunto de sensores a medida, configurado para las necesidades de la misión. Aunque en los experimentos expuestos el vehículo ha sido conducido, a efectos de la red es transparente si se trata de un robot autónomo. Aplicaciones de redes de sensores inalámbricas presentadas en otros trabajos son para emplazamientos fijos [33]. Los datos adquiridos son accesibles para otros vehículos o

participantes de la misión, lo que permite plantear avances hacia sistemas ciber-físicos que integren sensores, vehículos (tripulados o autónomos) o humanos.

Como contrapunto, se han realizado experimentos con una red implementada en base a un protocolo de largo alcance, como LoRa. Se configuró una red para dar cobertura a un área equivalente a la cubierta por la red híbrida basada en ZigBee. Esta red requirió el despliegue de cuatro concentradores en diversas localizaciones. Para facilitar la experimentación, se implementó igualmente un nodo móvil, pero con el objeto de desplazar nodos sensores a lo largo de la zona de interés, eliminando la necesidad de realizar un despliegue amplio de nodos. El nodo móvil también contó con un concentrador, que sirvió como equipo de control a efectos de los experimentos: el concentrador del nodo móvil recibía todos los datos enviados por los nodos finales montados en el vehículo. Con estos datos se podían comparar los obtenidos por los concentradores estáticos.

La red basada en LoRa presentaba, por lo demás, características comparables a la basada en ZigBee: permitió integrar fácilmente diferentes tipos nodos sensores de acuerdo a la necesidad del experimento, así como añadir nuevos nodos, sin que se presentaran problemas de compatibilidad.

Los experimentos se desarrollaron en también en la ciudad de Málaga, por las mismas zonas por las que se llevaron a cabo los experimentos de la otra red. El despliegue de la red basada en LoRa atendió a la idea de cubrir la mayor zona posible de la ruta seleccionada, de un modo análogo al caso de los experimentos con ZigBee.

Debido a que la red tiene varios concentradores, la activación del nodo LoRa se hace a través del modo ABP. Esto permite la multidifusión entre los dispositivos de la red, de modo que los paquetes de datos son enviados a varios concentradores. El nodo concentrador móvil también recibe todos los paquetes de datos. Esta estrategia permite comparar la cobertura de cada nodo concentrador estático desplegado en el entorno urbano seleccionado.

Los experimentos demuestran que, con el concentrador ubicado en el edificio del Pabellón de Gobierno de El Ejido, se obtiene una gran cobertura para la obtención de los paquetes de datos. Esto teniendo en cuenta su excelente línea de visión, así como por la configuración

definida en los nodos sensores. Los altos SF definidos para los nodos facilitan comunicaciones más robustas y un mayor alcance.

En el desarrollo de los experimentos se presentaron algunos problemas de comunicación por la distancia y por la presencia de algún obstáculo. Se utiliza el *Spread Factor* para tratar de corregir estos problemas. Sin embargo, mientras más alto sea, hay un mayor consumo de energía por los nodos. Así mismo la tasa de transferencia de datos permitida es más baja. Lo mismo sucede con el tamaño de la carga útil a enviar. Esto nos permite comprobar que, a mayor alcance, menor número de comunicaciones por día.

Los experimentos también permitieron demostrar que los concentradores estáticos recibieron y enviaron paquetes de datos. El alcance superó los cinco km de distancia, aunque esto depende de la ubicación del concentrador. Es necesario precisar que la línea de visión entre antenas es primordial para una efectiva transmisión de paquetes de datos. Lo que permite concluir que, si no hay una línea directa independiente de la distancia entre el nodo final y el concentrador, no se garantiza la entrega del paquete de datos. Esto también depende del espesor y material de los obstáculos, el paquete puede ser recibido en función de la potencia (dBm) y *Spread Factor* utilizado. Este regula el poder de penetración de las ondas de radio (en este caso, a 868 MHz).

En esta tesis se logró probar las prestaciones de una red basada en LoRa. Para esto se realizaron experimentos por una ruta de la ciudad de Málaga (ver sección 5.3). Se implementó la red con una topología en estrella (ver sección 4.4) por su facilidad de implementar y de gestionar la red. Se utilizó un nodo móvil diseñado específicamente para emular un conjunto de nodos sensores desplegados por la ciudad. Los datos que se tomaron son del entorno urbano de la ciudad de Málaga. Estos datos son temperatura, humedad y presión, (ver Tabla 5. 3), que se recolectaron a lo largo de una ruta urbana (ver Figura 5.7). Dentro de los experimentos se logró recolectar paquetes de datos con un concentrador localizado a 12 kilómetros (ver Figura 5.9), en un caso de buena visión directa y un concentrador en una localización elevada.

Las redes implementadas lograron recolectar información del entorno urbano de la ciudad de Málaga, no se presentaron problemas inconsistencias en los datos recolectados, como en otras investigaciones [35]. Esta información está disponible para que sea usada por cualquier

agente que lo requiera, logrando de esta manera contar con información suficiente (de acuerdo con el tipo y número de nodos sensores desplegados) y en tiempo real. Con la red de corto alcance se recolectaron 136 paquetes y con la red largo alcance 554. Lo que permite concluir que esta red recolecta un mayor número de paquetes. Sin embargo, para esta red se requiere el despliegue de una infraestructura fija, implementada con un gran número de concentradores. Así mismo, también es posible encontrar buenas ubicaciones como el pabellón de gobierno (El Ejido) con muy buena línea de visión, donde puede disminuir esta infraestructura fija.

En el caso específico del nodo móvil de corto alcance se basa en el protocolo ZigBee (ver sección 3.2). Se tomó como base una WSN estática denominada UIS (ver sección 3.6), que sirvió de base para la red híbrida obtenida a través de la incorporación del nodo móvil (ver sección 3.7.5). El nodo móvil se instaló en un vehículo eléctrico, realizándose varios experimentos a lo largo de rutas urbanas dentro de la ciudad de Málaga. Estos experimentos han mostrado que la arquitectura es flexible, y que mejoran considerablemente el alcance de la red, la propuesta de otras investigaciones [35], para redes de sensores inalámbrica es una red con un gran número de nodos transmisores para mejorar el alcance de la red. Frente a los experimentos con la red basada en LoRa, no se requieren emplazamientos fijos, como es el caso de la investigación [19], lográndose cubrir la misma zona. Lo que es ventajoso para la recolección de información en diversas zonas de interés, con un menor coste de la implementación de la red. Se pueden integrar nodos a la red para estudiar diferentes fenómenos, entre los que tenemos gases, temperatura, humedad, ruido, polvo, entre otros, con flexibilidad a requisitos cambiantes. Así, es posible configurar rápidamente un nodo móvil para captar información de una zona que no se haya previsto en un despliegue estático: pueden incorporarse los sensores más adecuados a la misión, y desplegar el nodo móvil en la zona de interés. Esta característica es muy valiosa en misiones como la búsqueda y rescate.

En cambio, la red basada en LoRa requiere desplegar concentradores en varias localizaciones, o escogerlas cuidadosamente, para obtener prestaciones comparables en cuanto a cobertura. Está sujeta además a limitaciones de propagación, si bien pueden mitigarse mediante la elección apropiada del SF y de los emplazamientos de los

concentradores, esto se puede verificar en la investigación [20]. En todo caso, la red híbrida basada en ZigBee no cuenta con estas limitaciones.

Con los experimentos de esta red se logró comprobar que la red de corto alcance con el nodo móvil puede cubrir la necesidad de información en una zona geográfica amplia, logrando validar la red implementada con ZigBee.

En el aspecto de seguridad las dos redes utilizan el algoritmo *Advanced Encryption Standard*, AES 128. Para la red de corto alcance (ver sección 3.5), se encarga de cifrar los datos para que sean leídos por el destinatario. Además, incluye un método de autenticación *Control keys* como *Link Key*, *Network Key*, que permite validar los nodos que se unen a la red. En el caso de la red largo alcance (ver sección 4.5), tiene dos capas independientes de seguridad: una clave de sesión de red *NwkSKey* (*Network Session Key*) garantiza la seguridad a nivel de red; mientras que una clave de aplicación. *AppSKey* (*Application Session Key*) garantiza la seguridad extrema a nivel de aplicación.

En la Tabla 5.4 se presenta algunas características de la red de corto alcance con ZigBee y la de largo alcance con LoRa, donde se puede concluir cuales son las ventajas y desventajas de cada red implementada. Esta tabla resume la contribución principal de esta tesis: la implementación de una red de sensores inalámbrica híbrida basada en una tecnología de corto alcance (ZigBee), capaz de recolectar información ambiental en una zona amplia sin necesidad de enrutamiento de múltiples saltos o métodos de reubicación dinámica, dando como resultado alcance y flexibilidad mejorados con respecto a una red estática, incluso cuando está basada en una tecnología específicamente de largo alcance como LoRa.

Tabla 5.4. Comparación de las redes de corto y largo alcance implementadas.

	ZigBee	LoRa
Coste	Bajo	Alto
Flexibilidad	Alta	Baja
Tasa de transferencia	Baja	Baja
Implementación	Móvil	Fija
Seguridad	Alta	Alta
Cobertura de la red	Amplia	Hasta 12 Km
Transferencia de datos	Baja	Baja
Banda	Libre	Libre
Protocolo	Abierto	Abierto
Integración de nuevos nodos	Alta	Alta
Comunicación de la red	Excelente	Depende de la línea de visión de las antenas
Arquitectura de la red	Híbrida	Estrella
Número paquetes recolectados	136	554



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro.

6.1. Conclusiones.

Las redes de sensores inalámbricas facilitan la obtención de información cuantitativa de algún fenómeno con persistencia en el tiempo, en un área geográfica extensa, o en ambos casos. En esta tesis se ha abordado este problema proponiendo una red de sensores inalámbrica híbrida (H-WSN), que incorpora un nodo móvil junto con nodos estáticos, y que permite cubrir un área amplia incluso estando basada en un protocolo de corto alcance, como es ZigBee. Esta red permite obtener información ambiental actualizada, que queda disponible para usuarios potenciales a través de una base de datos. Aunque los experimentos se han realizado implementando el nodo móvil de la red sobre un vehículo eléctrico tripulado, la red es compatible con sistemas autónomos, avanzando hacia los sistemas ciber-físicos. Como contrapunto, se ha desplegado una red de largo alcance, que permite contrastar y comparar las prestaciones de la red híbrida propuesta con las de una red basada en un protocolo, como LoRa, concebido directamente para dar cobertura a una región extensa.

Para la red de corto alcance se utiliza el protocolo ZigBee. Este protocolo es un estándar abierto que usa la banda libre de 2.4 MHz, con bajo consumo de energía, compatible con diferentes topologías de red. La red híbrida propuesta evolucionó a partir de una red completamente estática previa, denominada UIS. En esta tesis se ha propuesto una arquitectura que incorpora un nodo móvil que permite mejorar el alcance y la flexibilidad de la red sin la necesidad de volver a desplegar nodos estáticos.

Este nodo móvil está implementado sobre un vehículo eléctrico. Incluye un conjunto de nodos transmisores, que dependen de la misión, y un nodo coordinador, Este coordinador integra la información obtenida de los nodos transmisores, y se sincroniza con una base de datos externa. Para ello se han implementado dos modos de trabajo: modo local y modo en red.

En el modo local, el nodo móvil es visto por la red como un único nodo multisensor. Para hacerlo, se construye una trama mejorada que contiene la información de todos los sensores presentes en los nodos del transmisor dentro del nodo móvil. Una vez que se han recibido los datos de todos los sensores, el nodo coordinador crea una trama mejorada con datos de todos ellos, incluye datos de ubicación y actualiza la base de datos interna. En el modo en red, cuando los datos de cualquiera de los nodos transmisores están disponibles, se construye una trama y se envía al nodo coordinador embarcado, obteniéndose un mayor número de paquetes, debido a que éstos se envían cada vez que un nodo transmisor tiene datos.

Con esta H-WSN se han realizado experimentos que muestran que la red es capaz de cubrir una zona amplia de la ciudad de Málaga, lo que permite obtener un mayor alcance sin desplegar un elevado número de nodos estáticos. El nodo móvil también puede contribuir a mejorar la robustez de la red, utilizándose para dar cobertura a zonas en las que se registre una caída de red.

Para la red de largo alcance se trabaja con el protocolo LoRa. Este protocolo opera en la banda ISM en una frecuencia que depende de la región (868 MHz en Europa), y tiene bajo consumo de energía. La administración y comunicación de los dispositivos LoRa se hace con el protocolo LoRaWAN, que permite administrar y comunicar los dispositivos LoRa estableciendo conexiones inalámbricas bidireccionales seguras, móviles y de bajo costo. La topología de red usada es en estrella, por lo que cada dispositivo final se comunica con los concentradores y estos entregan la información al servidor de red.

La red desplegada ha estado integrada por cuatro concentradores estáticos, ubicados en diferentes localizaciones geográficas de la ciudad, y por un nodo móvil implementado a bordo de un vehículo eléctrico, que ha incluido un concentrador adicional y un conjunto de nodos finales. A diferencia del nodo móvil de la red de corto alcance, en este caso el propósito no es añadir capacidades a la red, sino simplificar la experimentación. Así, el uso de este nodo móvil permitió comprobar la cobertura de la red de largo alcance en las mismas zonas en las que se llevaron a cabo los experimentos con la red híbrida de corto alcance, sin necesidad de hacer un despliegue de nodos estáticos. El concentrador del nodo móvil recibía todos los datos enviados por los nodos finales montados en el vehículo, pudiéndose comparar con los recibidos por los concentradores estáticos.

Los experimentos han mostrado que el comportamiento de la red de largo alcance depende en gran medida de los emplazamientos elegidos para los concentradores estáticos. Así, el concentrador situado en el Pabellón de Gobierno en el Ejido recibió gran cantidad de los paquetes transmitidos desde el nodo móvil. En cambio, el concentrador instalado en el Centro Internacional de Español, en el sector de El Palo (zona Este), apenas si recibió algún paquete, incluso cuando el nodo móvil estaba en su proximidad. Para el caso de la red híbrida basada en ZigBee no se ha presentado este problema de cobertura de la red.

En esta tesis también se desarrollaron diferentes experimentos que permitieron demostrar las prestaciones de la red híbrida basada en ZigBee, y ponerlas en contraste con los resultados obtenidos con una red estática basada en LoRa.

6.2. Trabajo futuro.

Una línea interesante de trabajo futuro puede ser planificar el movimiento del nodo móvil de acuerdo con los datos adquiridos, para obtener una mejor cobertura o cantidad de datos.

Así mismo otra línea de trabajo puede ser extender el uso de la red propuesta a entornos naturales. En este contexto, una alternativa interesante es embarcar el nodo móvil en otro tipo de vehículo, como puede ser un UAV.

Un aspecto interesante es la evaluación del desempeño de una implementación alternativa basada en tecnologías diferentes, y su comparación con el enfoque propuesto en este trabajo.

Finalmente, se puede ser extender a LoRa la estrategia híbrida del nodo móvil utilizada con la red de corto alcance con ZigBee. Lo que se buscaría es ampliar el alcance de la red implementada con LoRa, además de cubrir una zona amplia sin necesidad de desplegar muchos concentradores en la zona de interés.

Es importante resaltar que la situación global impidió acometer una nueva estancia en la Universidad de Málaga y por consiguiente una nueva campaña de experimentos, que pretendía extender el alcance de la tesis a aplicaciones en entornos naturales y a su integración con robots terrestres y aéreos, siguiendo el camino ya esbozado en la publicación

del IROS 2018 [72]. Esta línea de trabajo deberá ser acometida en el futuro, junto con otras que conforman las líneas de desarrollo futuro:

- Trabajo en entornos naturales, que permitan recolectar información en una zona amplia con una red de corto alcance, así mismo se puede comprobar en estos entornos la flexibilidad de la red, agregando nuevos nodos a la red. Esta característica es muy relevante en la respuesta a fenómenos cambiantes, como es el caso de las aplicaciones en respuesta a emergencias descritas en [72].

- Planificación del movimiento de un robot móvil para mejorar la cobertura de la red o para recolectar información en una zona amplia de interés. En relación con la línea anterior, la arquitectura híbrida de la red de corto alcance propuesta facilita su integración con equipos de robots móviles, pudiendo beneficiarse su comportamiento si se configura un robot móvil como nodo móvil de la red, y se planifica su movimiento de acuerdo con criterios operativos como la necesidad de obtener información de una zona nueva, o la mejora de la cobertura, pudiéndose adoptar estrategias de captación de la información fuera de cobertura de la red, y desplazamiento del robot para transmitir los datos obtenidos.

- Explotación de los datos obtenidos a través de métodos de aprendizaje automático (*machine learning*). La arquitectura de la red de corto alcance propuesta facilita el procesamiento de los datos recolectados por la red, pudiendo plantearse, por ejemplo, estudiar la dinámica del comportamiento ambiental de la zona objeto de estudio.

Referencias.

- [1] F. Losilla, A.-J. Garcia-Sanchez, F. Garcia-Sanchez, J. Garcia-Haro, and Z. J. Haas, “A Comprehensive Approach to WSN-Based ITS Applications: A Survey,” *Sensors*, vol. 11, no. 11, pp. 10220–10265, Oct. 2011, doi: 10.3390/s111110220.
- [2] J. Rezazadeh, M. Moradi, and A. S. Ismail, “Mobile Wireless Sensor Networks Overview,” *Int. J. Comput. Commun. Networks*, vol. 2, no. 1, pp. 17–22, 2012.
- [3] L. G. Feng Zhao, *Wireless Sensor Networks: An Information Processing Approach*. Morgan Kaufmann., 2004. Accessed: Aug. 17, 2020. [Online]. Available: [https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=BkaQkhkWGfoC&oi=fnd&pg=PP2&dq=Wireless+sensor+networks,&ots=HVbEhNrZT5&sig=JzxuzSy0IODYiXcSWffJiRDAw_k#v=onepage&q=Wireless sensor networks%2C&f=false](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=BkaQkhkWGfoC&oi=fnd&pg=PP2&dq=Wireless+sensor+networks,&ots=HVbEhNrZT5&sig=JzxuzSy0IODYiXcSWffJiRDAw_k#v=onepage&q=Wireless%20sensor%20networks%2C&f=false)
- [4] F. S. Diana Archila, “Estado Del Arte De Las Redes De Sensores Inalámbricos,” *Tecnol. Investig. y Acad.*, vol. 1, no. 2, 2013.
- [5] J. P. Sócrates Muñoz, Andrés Toquica, “Red de sensores inalámbricos para el monitoreo de variables microclimáticas en el Relicto Vegetal Cedro Rosado,” *Sci. Tech.*, vol. 23, no. 4, pp. 501–510, 2019, doi: 10.22517/23447214.16471.
- [6] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey,” *Comput. Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002, doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4.
- [7] A. Ruano, S. Silva, H. Duarte, and P. M. Ferreira, “Wireless Sensors and IoT Platform for Intelligent HVAC Control,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 3, p. 370, Mar. 2018, doi: 10.3390/app8030370.
- [8] Libelium, “802.15.4 vs ZigBee.” 2009. Accessed: May 05, 2020. [Online]. Available: <http://www.libelium.com/802-15-4-vs-zigbee/#!prettyPhoto>
- [9] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, “IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems LAN and MAN--Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and

- Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Std 802.11-2016,” *IEEE Std 802.11-2016 (Revision IEEE Std 802.11-2012)*, vol. 2016, pp. 1–3534, 2016, doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7786995.
- [10] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, “IEEE SA - 802.16n-2013 - IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems--Amendment 2: Higher Reliability Networks,” *IEEE Std 802.16-2013*, 2013. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6547982> (accessed Aug. 20, 2020).
- [11] J. Salazar, *Redes inalámbricas*. Techpedia: eské vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická, 2016. [Online]. Available: <http://www.techpedia.eu>
- [12] A. Cama, F. G. Montoya, J. Gómez, J. L. De La Cruz, and F. Manzano-Agugliaro, “Integration of communication technologies in sensor networks to monitor the Amazon environment,” *J. Clean. Prod.*, vol. 59, pp. 32–42, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.06.041.
- [13] M. A. Matin, M. N. Islam, M. A. Matin, and M. M. Islam, “Overview of Wireless Sensor Network Chapter 1 Overview of Wireless Sensor Network,” no. February 2015, Sep. 2012, doi: 10.5772/49376.
- [14] J. S. Wilson, *Sensor Technology Handbook*. Elsevier Inc., 2005. doi: 10.1016/B978-0-7506-7729-5.X5040-X.
- [15] R. F. Martínez, “Utilización de redes de sensores inalámbricas y técnicas de aprendizaje automático para la obtención de conocimiento útil en entornos vitivinícolas,” Universidad de la Rioja, 2012.
- [16] F. Javier, M. De Pisón, A. G. Marcos, and F. A. Elías, *Redes inalámbricas de sensores : teoría y aplicación práctica Roberto Fernández Martínez , Joaquín Ordieres Meré* , no. May 2014. 2009.
- [17] A. S. Tonneau, N. Mitton, and J. Vandaele, “A survey on (mobile) wireless sensor network experimentation testbeds,” in *Proceedings - IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, DCOSS 2014*, 2014, pp. 263–268. doi: 10.1109/DCOSS.2014.41.
- [18] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: A survey,” *Comput. Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, Mar. 2002, doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4.

- [19] J. Fernández *et al.*, “Sistema móvil de información aplicado a la movilidad urbana,” 28/11/2014, pp. 14–15, 2016, [Online]. Available: http://www.aopandalucia.es/inetfiles/resultados_IDI/GGI3000IDIZ/memoria/Memoria_Tecnica.pdf
- [20] Juan Bravo Arrabal, “Desarrollo e implementación de una red de sensores inalámbricos de baja potencia y largo alcance.,” Universidad de Malaga, 2019.
- [21] UN, “World Urbanization Prospects - Population Division - United Nations,” *United Nations*. 2019. Accessed: Aug. 22, 2020. [Online]. Available: <https://population.un.org/wup/Download/>
- [22] C. Morandi, A. Rolando, and S. Di Vita, “From Smart City to Smart Region,” *SpringerBriefs Appl. Sci. Technol.*, vol. 30, pp. 93–103, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-17338-2.
- [23] L. G. Anthopoulos and A. Vakali, “Urban planning and smart cities: Interrelations and reciprocities,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 7281 LNCS, pp. 178–189, 2012, doi: 10.1007/978-3-642-30241-1_16.
- [24] J. H. Lee, M. G. Hancock, and M. C. Hu, “Towards an effective framework for building smart cities: Lessons from Seoul and San Francisco,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 89, pp. 80–99, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.techfore.2013.08.033.
- [25] World Health Organization Regional Office for Europe, “Air quality guidelines for {Europe}; second edition,” 2000. Accessed: Aug. 22, 2020. [Online]. Available: <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8681>
- [26] O. US EPA, “Impacto del monóxido de carbono en la calidad del aire de los interiores”, Accessed: Aug. 22, 2020. [Online]. Available: <https://espanol.epa.gov/cai/impacto-del-monoxido-de-carbono-en-la-calidad-del-aire-de-los-interiores>
- [27] C. E. Kolb *et al.*, “Mobile laboratory with rapid response instruments for real-time measurements of urban and regional trace gas and particulate distributions and emission source characteristics,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 38, no. 21, pp. 5694–5703, Nov. 2004, doi: 10.1021/es030718p.
- [28] Q. Jiang *et al.*, “Citizen Sensing for Improved Urban Environmental Monitoring,” *J. Sensors*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/5656245.
- [29] B. Rashid and M. H. Rehmani, “Applications of wireless sensor networks for urban areas: A

- survey,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 60, pp. 192–219, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.JNCA.2015.09.008.
- [30] D. Rainham, “A wireless sensor network for urban environmental health monitoring: UrbanSense,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, May 2016, vol. 34, no. 1. doi: 10.1088/1755-1315/34/1/012028.
- [31] N. Bebelaar *et al.*, “Monitoring urban environmental phenomena through a wireless distributed sensor network,” *Smart Sustain. Built Environ.*, vol. 7, no. 1, pp. 68–79, Apr. 2018, doi: 10.1108/SASBE-10-2017-0046.
- [32] B. Rashid and M. H. Rehmani, “Applications of wireless sensor networks for urban areas: A survey,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 60. Academic Press, pp. 192–219, Jan. 01, 2016. doi: 10.1016/j.jnca.2015.09.008.
- [33] J. J. Fernández-Lozano, M. Martín-Guzmán, J. Martín-Ávila, and A. García-Cerezo, “A Wireless Sensor Network for Urban Traffic Characterization and Trend Monitoring,” *Sensors*, vol. 15, no. 10, pp. 26143–26169, Oct. 2015, doi: 10.3390/s151026143.
- [34] K. K. Khedo, R. Perseedoss, and A. Mungur, “A Wireless Sensor Network Air Pollution Monitoring System,” *Int. J. Wirel. Mob. Networks*, vol. 2, no. 2, pp. 31–45, 2010, doi: 10.5121/ijwmn.2010.2203.
- [35] X. Fang and I. Bate, “Issues of using wireless sensor network to monitor urban air quality,” in *FAILSAFE 2017 - Proceedings of the 1st ACM International Workshop on the Engineering of Reliable, Robust, and Secure Embedded Wireless Sensing Systems, Part of SenSys 2017*, 2017, pp. 32–39. doi: 10.1145/3143337.3143339.
- [36] C. L. Ramírez, “Diseño de una arquitectura para redes de sensores con soporte para aplicaciones de detección de eventos,” Universidad Politécnica de Valencia, 2012.
- [37] Z. Alliance, “ZigBee Specification,” 2015. [Online]. Available: <https://zigbeealliance.org/wp-content/uploads/2019/11/docs-05-3474-21-0csg-zigbee-specification.pdf>
- [38] J. Carballar, *Wi-Fi : lo que se necesita conocer*. Alfaomega, 2010. Accessed: Apr. 22, 2020. [Online]. Available: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=rQmH6IKyvigC&oi=fnd&pg=PR11&dq=que+es+la+tecnologia+wifi&ots=jQhsjaQbi7&sig=Iuhsclr3Scn1PdM4LKznWe0Q8cM#v=onepage&q=que es la tecnologia wifi&f=false>

- [39] M. Technology, “MiWi Protocol,” *Microchip Technology*, 2020. <https://www.microchip.com/design-centers/wireless-connectivity/embedded-wireless/802-15-4/software/miwi-protocol> (accessed Apr. 29, 2020).
- [40] Alliancen-EnOcean, “El estándar inalámbrico autoalimentado para edificios inteligentes.” <https://www.enocean-alliance.org/> (accessed Apr. 22, 2020).
- [41] Z. Alliance, “Home - Zigbee Alliance.” <https://zigbeealliance.org/> (accessed Apr. 24, 2020).
- [42] IEEE Computer Society, “IEEE Std 802.15.4-2015 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011),” *IEEE Stand.*, vol. 2015, p. 709, 2015, doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7460875.
- [43] IEEE Standards Associations, “802.11ah-2016 - Estándar IEEE para Tecnología de la información - Telecomunicaciones e intercambio de información entre sistemas - Redes de área local y metropolitana - Requisitos específicos - Parte 11: Especificaciones de Control de acceso medio (MAC) y,” 2016. https://standards.ieee.org/standard/802_11ah-2016.html (accessed Apr. 29, 2020).
- [44] Libelium, “Waspote Plug & Sense,” *Waspote Technical Guide*, 2013. <http://www.libelium.com/es/> (accessed May 01, 2020).
- [45] A. Wi-Fi, “Alianza Wi-Fi,” 2020. <https://www.wi-fi.org/> (accessed Apr. 27, 2020).
- [46] R. Durango, E. Armijos, and G. Prado, “Estudio, análisis y optimización del tráfico de las redes wifi en la facultad de ingeniería en electricidad y computación,” Espol, 2015.
- [47] “Ventajas y Desventajas - WIFI.” <https://sites.google.com/site/wifialina/ventajas-y-desventajas> (accessed Apr. 27, 2020).
- [48] M. Technology, “MiWi Protocol.” <https://www.microchip.com/design-centers/wireless-connectivity/embedded-wireless/802-15-4/software/miwi-protocol> (accessed Apr. 22, 2020).
- [49] M. Quick and S. Guide, “MiWi™ Quick Start Guide,” *MiWi*, 2019.
- [50] International Organization for Standardization, *ISO/IEC 14543-3-10:2012 - Information technology -- Home electronic systems (HES) architecture -- Part 3-10: Wireless short-packet (WSP) protocol optimized for energy harvesting -- Architecture and lower layer protocols*. 2012. Accessed: May 01, 2020. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/59865.html>
- [51] EnOcean, “Soluciones y redes de sensores inalámbricos para la recolección de energía de

- EnOcean,” 2013. <https://www.enocean.com/> (accessed May 01, 2020).
- [52] A. C. Monter, “Desarrollo de un sistema de monitorización domiciliaria basado en la plataforma NodeMCU V3,” Universidad Politécnica de Valencia., 2017.
- [53] R. Gustavo, “El mundo de la tecnología inalámbrica para alimentar a dispositivos electrónicos sin baterías,” *Tecnol. Humaniz.*, 2020, Accessed: May 01, 2020. [Online]. Available: <https://humanizationoftechnology.com/el-mundo-de-la-tecnologia-inalambrica-para-alimentar-a-dispositivos-electronicos-sin-baterias/revista/sensorica/01/2020/>
- [54] A. Wi-Fi, “Wi-Fi HaLow,” 2020. <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-halow> (accessed Apr. 27, 2020).
- [55] Semtech Corporation, “What is LoRa? | Semtech LoRa Technology | Semtech,” 2018. <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora> (accessed May 02, 2020).
- [56] Semtech Corporation, “LoRa y LoRaWAN: Descripción técnica.” <https://lora-developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/> (accessed May 02, 2020).
- [57] LoRa Alliance, “Home page | LoRa Alliance®,” *LoRa Alliance*. 2019. Accessed: May 02, 2020. [Online]. Available: <https://lora-alliance.org/>
- [58] D. International, “Productos etiquetados DigiMesh.,” *Digi*. <https://www.digi.com/products/tag/digimesh> (accessed Apr. 29, 2020).
- [59] D. International, “Productos etiquetados DigiMesh.” <https://www.digi.com/products/tag/digimesh> (accessed Apr. 22, 2020).
- [60] V. Ferrer, “Qué es Sigfox - ¿Como funciona esta red IOT? Usos y casos de éxito,” *5 de septiembre 2019*, 2019. <https://vicentferrer.com/sigfox/> (accessed May 02, 2020).
- [61] Sigfox, “Technology | Sigfox,” 2020. <https://www.sigfox.com/en/what-sigfox/technology> (accessed May 02, 2020).
- [62] S. Li, L. Da Xu, and S. Zhao, “The internet of things: a survey,” *Inf. Syst. Front.*, vol. 17, no. 2, pp. 243–259, 2015, doi: 10.1007/s10796-014-9492-7.
- [63] IEEE Standards Associations, *IEEE 802.15.4-2015 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks*. 2016. Accessed: Apr. 24, 2020. [Online]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2015.html

- [64] “(2) (PDF) Sobre la coexistencia de ZigBee en la banda ISM: mediciones y simulaciones”, Accessed: Jul. 15, 2020. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/263194872_On_ZigBee_Coexistence_in_the_ISM_Band_Measurements_and_Simulations
- [65] M. D. C. DE COLOMBIA, “RESOLUCIÓN 689 DE ABRIL 21 DE 2004 - RESOLUCIÓN 689 DE 2004,” 2004. http://legal.legis.com.co/document/Index?obra=legcol&document=legcol_75992041f192f034e0430a010151f034 (accessed Jul. 05, 2020).
- [66] J. C. i S. et al, *Redes de comunicaciones. De la telefonía móvil a internet* -. Universidad Politécnica de Catalunya, 2010. Accessed: Jul. 05, 2020. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=2D9FO9nX-XsC&pg=PA110&lpg=PA110&dq=de+2.4+GHz+se+usa+a+nivel+mundial+y+las+frecuencias+de+868+MHz+en+Europa+y+915+MHz&source=bl&ots=qxsziWrijL&sig=ACfU3U18-DajETln7BDs15Xu0eJ5Fvg1oQ&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwj-r6j0xbbq>
- [67] Z. Alliance, “ZigBee Specification,” 2015.
- [68] DIGI, “ID (Extended PAN ID),” 2019. https://www.digi.com/resources/documentation/Digidocs/90002002/Content/Reference/r_cmd_ID.htm (accessed Jul. 18, 2020).
- [69] IEEE Standards Associations, “IEEE 802.15.4.” doi: 10.14400/JDPM.2012.10.11.419.
- [70] C. Alberto, V. Romero, J. Erickson, B. Jaimes, D. Carolina, and P. González, “La Tecnología ZigBee estudio de las características de la capa física ZigBee Technology study of the characteristics of the physical layer,” *Sci. Tech.*, vol. 22, no. 3, pp. 238–245, 2017.
- [71] J. M. Moreno and D. R. Fernández, “Protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4),” *DTIC*, pp. 2–36, 2015, [Online]. Available: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/1109/7/Informe_ZigBee.pdf
- [72] J. J. Fernandez-Lozano *et al.*, “Integration of a Canine Agent in a Wireless Sensor Network for Information Gathering in Search and Rescue Missions*This work was partially funded by the Spanish project DPI2015-65186-R. the publication has received support from Universidad de Málaga Campu,” in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Dec. 2018, pp. 5685–5690. doi: 10.1109/IROS.2018.8593849.

- [73] Libelium, “Waspote Data Frame,” 2013. [Online]. Available: https://www.libelium.com/wp-content/uploads/2013/02/data_frame_guide.pdf
- [74] L. C. D. S.L. and INDEX, “Waspote ZigBee,” *Network*, vol. 1, p. 61, 2017.
- [75] Libelium, “Meshlium Guide,” 2020. [Online]. Available: <http://www.libelium.com/development/meshlium/documentation/meshlium-technical-guide/>
- [76] Libelium, “Meshlium Technical Guide,” 2020. Accessed: Apr. 06, 2020. [Online]. Available: <http://www.libelium.com/development/meshlium/documentation/meshlium-technical-guide/>
- [77] Domodesk, “a Fondo: Zigbee.” Accessed: May 16, 2020. [Online]. Available: <https://www.domodesk.com/216-a-fondo-zigbee.html>
- [78] J. E. Briceño, *Transmisión de datos.*, 3 Edición. Merida: Universidad de los Andes., 2015. Accessed: Jul. 20, 2020. [Online]. Available: <http://www.serbi.ula.ve/serbiula/libros-electronicos/Libros/trasmisiondedatos/pdf/librocompleto.pdf>
- [79] J. Dignani, “Análisis del protocolo zigbee,” Universidad Nacional de la Plata, 2011. Accessed: May 14, 2020. [Online]. Available: http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/18349%5Cnhttp://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/18349/Especializacion-Redes-Dignani.pdf?sequence=1%5Cnhttp://postgrado.info.unlp.edu.ar/Carreras/Especializaciones/Redes_y_Seguridad/Trabajos_Finales/Dignanni
- [80] D. Gislason, *Zigbee Wireless Networking*. Elsevier Ltd, 2008. doi: 10.1016/B978-0-7506-8597-9.X0001-8.
- [81] Libelium, “Daemons.” <http://www.libelium.com/?s=Daemons> (accessed May 23, 2020).
- [82] Z. Applications, “Identificador de red: una descripción general,” 2008. Accessed: May 19, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/network-identifier>
- [83] Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L, “Waspote Encryption Libraries Programming guide,” pp. 12–21, 2015, [Online]. Available: http://www.libelium.com/downloads/documentation/encryption_libraries_guide_eng.pdf
- [84] Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L, “Waspote Encryption Libraries - AES / RSA Cryptography for Sensor NetworksWaspote Encryption Libraries - AES / RSA

- Cryptography for Sensor Networks | Libelium,” 2017. <http://www.libelium.com/products/waspmote/encryption/> (accessed May 21, 2020).
- [85] Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L, “Security in 802.15.4 and ZigBee networks.” Accessed: May 20, 2020. [Online]. Available: <http://www.libelium.com/security-802-15-4-zigbee/#!prettyPhoto>
- [86] J. Fernández *et al.*, “Sistema móvil de información aplicado a la movilidad urbana,” 2014. [Online]. Available: http://www.aopandalucia.es/inetfiles/resultados_IDI/GGI3000IDIZ/memoria/Memoria_Tecnica.pdf
- [87] J. J. Fernández-Lozano, J. A. Gomez-Ruiz, M. Martín-Guzmán, J. Martín-Ávila, S. B. Carlos, and A. García-Cerezo, “Wireless Sensor Networks for Urban Information Systems: Preliminary Results of Integration of an Electric Vehicle as a Mobile Node,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Nov. 2018, vol. 694, pp. 190–199. doi: 10.1007/978-3-319-70836-2_16.
- [88] M. Martin-Guzman, J. Martin-Avila, J. J. Fernandez-Lozano, and A. Garcia-Cerezo, “A rapid deployment wireless sensor network for sustainable urban mobility,” in *2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2015 - Conference Proceedings*, Jul. 2015, pp. 967–972. doi: 10.1109/MED.2015.7158883.
- [89] M. Rout and R. Roy, “Dynamic deployment of randomly deployed mobile sensor nodes in the presence of obstacles,” *Ad Hoc Networks*, vol. 46, pp. 12–22, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.adhoc.2016.03.004.
- [90] C. B. Sixto, H. Cabrera Meza, A. Cervelion Bastidas, and A. Aguirre Cabrera, “Capítulo 1 : Las redes de sensores inalámbricas , arquitectura y aplicaciones,” 2019, [Online]. Available: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/book/article/view/3191>
- [91] R. Fernández Martínez, J. B. Ordieres Meré, F. J. de Pisón, A. González Marcos, F. Alba, and R. Lostado Lorza, *Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica*. 2009.
- [92] Lora Alliance, “A technical overview of LoRa ® and LoRaWAN™ What is it?,” 2015. Accessed: Aug. 07, 2020. [Online]. Available: <https://lora-alliance.org/resource-hub/what-lorawantm>
- [93] LoRa Alliance®, “A technical overview of LoRa ® and LoRaWAN™ What is it?,” 2015.

- Accessed: Sep. 10, 2020. [Online]. Available: <https://lora-alliance.org/resource-hub/what-lorawantm>
- [94] P. D. D. Semtech, “Desarrollo de dispositivos basados en LoRaWAN: cosas que debe saber.” <https://lora-developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/the-book/> (accessed Aug. 03, 2020).
- [95] Semtech, “Aplicaciones LoRa | Tecnología Semtech LoRa |,” 2017. <https://www.semtech.com/lora/lora-applications> (accessed Aug. 03, 2020).
- [96] Semtech, “Semtech LoRa Technology Overview,” 2019. <https://www.semtech.com/lora> (accessed Aug. 03, 2020).
- [97] I. O. Monfort, “Estudio de la arquitectura y el nivel de desarrollo de la red LoRaWAN y de los dispositivos LoRa.” 2017, Accessed: Aug. 04, 2020. [Online]. Available: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/64365/6/iordonezTFM0617memòria.pdf%0Ahttp://hdl.handle.net/10609/64365>
- [98] Semtech, “LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview,” 2020. Accessed: Aug. 03, 2020. [Online]. Available: https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf
- [99] M. de T. de la I. y las C. . Colombia, “RESOLUCION 711 DE 2016,” 2016. <http://www.suin-juricol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Resolucion/30038104> (accessed Aug. 07, 2020).
- [100] Semtech, “Aplicaciones y equipos de seguridad industrial,” 2020. <https://www.semtech.com/company/security> (accessed Aug. 04, 2020).
- [101] X. Muñoz, “Tecnología LoraWan.” *DSET Energy*, 2019. <http://www.dset-energy.com/2019/07/12/descripcion-lorawan/> (accessed Aug. 04, 2020).
- [102] L. A. T. C. R. Parameters, “LoRaWAN 1.1 Regional Parameters 2,” 2017. Accessed: Aug. 07, 2020. [Online]. Available: https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_regional_parameters_v1.1rb_-_final.pdf
- [103] Lora Alliance, “LoRaWAN 1.0.3 Specification.” 2018.
- [104] Semtech, “Resumen | Recursos | Tecnología Semtech LoRa |,” *Semtech*, 2020. <https://www.semtech.com/lora/resources> (accessed Aug. 04, 2020).

- [105] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, "A study of Lora: Long range & low power networks for the internet of things," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 9, Sep. 2016, doi: 10.3390/s16091466.
- [106] G. CARRACEDO, "Ciberseguridad en LoRa y LoRaWAN - Contexto y un poco de historia -," 2020. <https://www.tarlogic.com/blog/ciberseguridad-en-lora-y-lorawan-contexto-y-un-poco-de-historia/> (accessed Aug. 04, 2020).
- [107] Tech Play On, "LoRa- (Long Range) Network and Protocol Architecture with Its Frame Structure [web page]," *Blog TechPlayOn*, 2018. <http://www.techplayon.com/lora-long-range-network-architecture-protocol-architecture-and-frame-formats/> (accessed Aug. 06, 2020).
- [108] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, "A study of Lora: Long range & low power networks for the internet of things," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 9, p. 1466, Sep. 2016, doi: 10.3390/s16091466.
- [109] R. Sáenz Esteban, "Estudio de los parámetros principales de la tecnología LoRa para el despliegue de redes e implementación de servicios IoT en la CAV-EAE," Universidad del País Vasco, 2018.
- [110] P. Sotres, J. R. Santana, L. Sanchez, J. Lanza, and L. Munoz, "Practical Lessons from the Deployment and Management of a Smart City Internet-of-Things Infrastructure: The SmartSantander Testbed Case," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 14309–14322, Jul. 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2723659.
- [111] LoRaWAN, "About LoRaWAN™ | LoRa Alliance™," *What is the LoRaWAN™ Specification?*, 2019. <https://loro-alliance.org/about-lorawan> (accessed Aug. 07, 2020).
- [112] Libelium, "Waspote Plug & Sense ! Quick Overview," *Waspote Tech. Guid.*, no. February, pp. 1–46, 2018.
- [113] A. de N. de C. System and A. de N. de C. System, *Fundamentos de Redes Inalámbricas*. Madrid: Pearson Educación,S.A., 2006.
- [114] M. El-Aasser, P. Edwarda, M. Mandoura, M. Ashoura, and T. Elshabrawya, "A Comprehensive Hybrid Bit-level and Packet-level LoRa-LPWAN Simulation Model," *Internet of Things*, vol. 14, p. 100386, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.iot.2021.100386.



UNIVERSIDAD
DE MALAGA

Apéndices.

Apéndice A.

Encabezamiento										Datos de los sensores					
A	B	C	D	E	D	F	D	G	D	Sensor_1	D	Sensor_2	D	Sensor_3	D
<=>	0x80	0x03	#	387244595	#	NGAS	#	11	#	CO2:331.409	#	NH3:1.492	#	AP:131.83	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	NGPS	#	48	#	GPS:36.720272,-4.349771	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	NGPS	#	49	#	GPS:36.720268,-4.349767	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	NGPS	#	50	#	GPS:36.720268,-4.349775	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	NGPS	#	51	#	GPS:36.720245,-4.349782	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	NGPS	#	52	#	GPS:36.720242,-4.349782	#				
<=>	0x80	0x02	#	387244595	#	NGAS	#	12	#	TEMP:24.03	#	HUM:71.5	#		
<=>	0x80	0x02	#	387244595	#	NGAS	#	13	#	O2:18.794	#	VOC:1.76209	#		
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	NGPS	#	53	#	GPS:36.720238,-4.349785	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	NGPS	#	54	#	GPS:36.720238,-4.349807	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	NGPS	#	55	#	GPS:36.720257,-4.349757	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	NGPS	#	56	#	GPS:36.720253,-4.349745	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	NGPS	#	57	#	GPS:36.720230,-4.349773	#				
<=>	0x80	0x03	#	387244595	#	NGAS	#	14	#	CO2:332.114	#	NH3:1.475	#	AP:132.10	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	58	#	GPS:36.720230,-4.349777	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	59	#	GPS:36.720249,-4.349757	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	60	#	GPS:36.720257,-4.349753	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	61	#	GPS:36.720257,-4.349753	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	62	#	GPS:36.720257,-4.349760	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	63	#	GPS:36.720257,-4.349745	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	64	#	GPS:36.720257,-4.349743	#				
<=>	0x80	0x02	#	387244595	#	NGAS	#	15	#	TEMP:24.68	#	HUM:71.20	#		
<=>	0x80	0x02	#	387244595	#	NGAS	#	16	#	O2:18.698	#	VOC:1.93993	#		
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	65	#	GPS:36.720257,-4.349741	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	66	#	GPS:36.720242,-4.349741	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	67	#	GPS:36.720242,-4.349797	#				

Apéndices.

<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	68	#	GPS:36.720249,-4.349783	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	69	#	GPS:36.720383,-4.349657	#
<=>	0x80	0x03	#	387244595	#	GAS	#	17	#	CO2:332.036	# NH3:1.499 # AP:131.95 #
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	70	#	GPS:36.720428,-4.349602	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	71	#	GPS:36.720493,-4.349543	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	72	#	GPS:36.719578,-4.350820	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	73	#	GPS:36.719494,-4.350966	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	74	#	GPS:36.719494,-4.350998	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	75	#	GPS:36.719501,-4.350993	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	76	#	GPS:36.719570,-4.351252	#
<=>	0x80	0x02	#	387244595	#	NGAS	#	18	#	TEMP:26.13	# HUM:70.7 #
<=>	0x80	0x02	#	387244595	#	NGAS	#	19	#	O2:18.504	# VOC:1.84927 #
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	77	#	GPS:36.719559,-4.351247	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	78	#	GPS:36.720085,-4.352318	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	79	#	GPS:36.720253,-4.353889	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	80	#	GPS:36.720692,-4.356785	#
<=>	0x80	0x03	#	387244595	#	NGAS	#	20	#	CO2:332.193	# NH3:1.485 # AP:132.24 #
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	NGPS	#	81	#	GPS:36.720848,-4.357680	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	NGPS	#	82	#	GPS:36.721104,-4.360242	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	NGPS	#	83	#	GPS:36.721096,-4.360897	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	NGPS	#	84	#	GPS:36.721336,-4.362478	#
<=>	0x80	0x02	#	387244595	#	NGAS	#	21	#	TEMP:23.87	# HUM:70.3 #
<=>	0x80	0x02	#	387244595	#	NGAS	#	22	#	O2:19.085	# VOC:1.42802 #
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	85	#	GPS:36.721630,-4.363220	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	86	#	GPS:36.722065,-4.364815	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	87	#	GPS:36.722317,-4.366760	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	88	#	GPS:36.722363,-4.368630	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	89	#	GPS:36.722301,-4.372442	#
<=>	0x80	0x03	#	387244595	#	NGAS	#	23	#	CO2:332.114	# NH3:1.487 # AP:132.02 #
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	90	#	GPS:36.722355,-4.374267	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	91	#	GPS:36.722115,-4.378480	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	92	#	GPS:36.721836,-4.384040	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	93	#	GPS:36.722389,-4.387465	#

Apéndices.

<=>	0x80	0x02	#	387244595	#	NGAS	#	24	#	TEMP:23.55	#	HUM:71.0	#		
<=>	0x80	0x02	#	387244595	#	NGAS	#	25	#	O2:19.182	#	VOC:1.27315	#		
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	94	#	GPS:36.722607,-4.388041	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	95	#	GPS:36.722618,-4.387952	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	96	#	GPS:36.722633,-4.388866	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	97	#	GPS:36.722767,-4.390242	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	98	#	GPS:36.723351,-4.392885	#				
<=>	0x80	0x03	#	387244595	#	NGAS	#	26	#	CO2:332.153	#	NH3:1.489	#	AP:132.15	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	99	#	GPS:36.723610,-4.394613	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	100	#	GPS:36.723675,-4.395510	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	101	#	GPS:36.723385,-4.396703	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	102	#	GPS:36.722881,-4.398278	#				
<=>	0x80	0x02	#	387244595	#	NGAS	#	27	#	TEMP:24.68	#	HUM:72.2	#		
<=>	0x80	0x02	#	387244595	#	NGAS	#	28	#	O2:19.085	#	VOC:1.37480	#		
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	103	#	GPS:36.722881,-4.398252	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	104	#	GPS:36.722195,-4.400375	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	105	#	GPS:36.721539,-4.403050	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	106	#	GPS:36.721138,-4.406835	#				
<=>	0x80	0x03	#	387244595	#	NGAS	#	29	#	CO2:332.114	#	NH3:1.474	#	AP:132.27	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	107	#	GPS:36.720963,-4.408802	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	108	#	GPS:36.720982,-4.409337	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	109	#	GPS:36.720963,-4.409273	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	110	#	GPS:36.720985,-4.411543	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	111	#	GPS:36.720058,-4.414030	#				
<=>	0x80	0x02	#	387244595	#	NGAS	#	30	#	TEMP:23.71	#	HUM:74.3	#		
<=>	0x80	0x02	#	387244595	#	NGAS	#	31	#	O2:19.085	#	VOC:1.78357			
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	112	#	GPS:36.719753,-4.415108	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	113	#	GPS:36.718822,-4.418522	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	114	#	GPS:36.717731,-4.422348	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	115	#	GPS:36.717411,-4.423333	#				
<=>	0x80	0x03	#	387244595	#	NGAS	#	32	#	CO2:332.114	#	NH3:1.502	#	AP: 132.00	#
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	116	#	GPS:36.717415,-4.423338	#				
<=>	0x80	0x01	#	387264467	#	GPS	#	117	#	GPS:36.717350,-4.423276	#				

Apéndices.

```

<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 118 # GPS:36.717258,-4.423769 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 119 # GPS:36.717133,-4.424300 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 120 # GPS:36.716770,-4.425715 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 121 # GPS:36.716656,-4.427165 #
<=> 0x80 0x02 # 387244595 # NGAS # 33 # TEMP:25.81 # HUM:73.8 #
<=> 0x80 0x02 # 387244595 # NGAS # 34 # O2:19.085 # VOC:1.24064 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 122 # GPS:36.716648,-4.427457 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 123 # GPS:36.716595,-4.428807 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 124 # GPS:36.716644,-4.428792 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 125 # GPS:36.716644,-4.428807 #
<=> 0x80 0X03 # 387244595 # NGAS # 35 # CO2:332.114 # NH3:1.496 AP:132.54 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 126 # GPS:36.716621,-4.429085 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 127 # GPS:36.716965,-4.430676 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 128 # GPS:36.717220,-4.434623 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 129 # GPS:36.717152,-4.437274 #
<=> 0x80 0x02 # 387244595 # NGAS # 36 # TEMP:25.48 # HUM:71.5 #
<=> 0x80 0x02 # 387244595 # NGAS # 37 # O2:18.891 # VOC:1.01747 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 130 # GPS:36.716610,-4.440198 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 131 # GPS:36.716297,-4.441992 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 132 # GPS:36.716305,-4.442037 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 133 # GPS:36.715752,-4.444772 #
<=> 0x80 0x03 # 387244595 # NGAS # 38 # CO2:331.996 # NH3:1.513 # AP:132.41 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 134 # GPS:36.715527,-4.446649 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 135 # GPS:36.715346,-4.447702 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 136 # GPS: 36.714713,-4.449996 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 137 # GPS: 36.714381,-4.451124 #
<=> 0x80 0x02 # 387244595 # NGAS # 39 # TEMP:25.21 # HUM:71.7 #
<=> 0x80 0x02 # 387244595 # NGAS # 40 # O2:18.982 # VOC:1.31624 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 138 # GPS: 36.714170,-4.452328 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 139 # GPS: 36.713809,-4.453980 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 140 # GPS: 36.713417,-4.455783 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 141 # GPS: 36.712994,-4.457854 #
<=> 0x80 0X03 # 387244595 # NGAS # 41 # CO2:332.057 # NH3:1.511 AP:132.12 #

```

Apéndices.

<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 142 # GPS: 36.712782, -4.459396 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 143 # GPS: 36.712571, -4.460751 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 144 # GPS: 36.712601, -4.462669 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 145 # GPS: 36.712782, -4.465112 #
<=> 0x80 0x02 # 387244595 # NGAS # 42 # TEMP:24.68 # HUM:72.2 #
<=> 0x80 0x02 # 387244595 # NGAS # 43 # O2:19.085 # VOC:1.10321 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 146 # GPS: 36.712992, -4.466951 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 147 # GPS: 36.713233, -4.469393 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 148 # GPS: 36.713413, -4.471533 #
<=> 0x80 0x01 # 387264467 # GPS # 149 # GPS: 36.713402, -4.470782 #
<=> 0x80 0x03 # 387244595 # NGAS # 44 # CO2:332.193 # NH3:1.519 # AP:131.71 #