

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INTEGRACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN
EL SISTEMA ELÉCTRICO**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***TECNOLOGÍA DE COMUNICACIONES WI-
SUN COMO SOLUCIÓN IOT PARA LAS
REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES***

Estudiante
Director/Directora
Departamento
Curso académico

Urquiza, Morales, Mireia
Zamora, Belver, Inmaculada
Eléctrico
2019-2020

Bilbao, 14 de Septiembre del 2020

RESUMEN/LABURPENA/ABSTRACT**CASTELLANO**

Mediante este proyecto se realiza un análisis de una tecnología de comunicaciones nueva llamada Wi-SUN para su futura implementación en los contadores inteligentes, favoreciendo a la transformación de las redes eléctricas convencionales en redes inteligentes.

Para ello, primero, se realiza una investigación alrededor de las diferentes tecnologías de comunicaciones actuales aplicadas a las redes eléctricas inteligentes, comparándolas con esta nueva tecnología.

Después, se describen los aspectos más característicos de la tecnología y se analiza su estructura dando a conocer los diferentes protocolos de los que se compone

Por último, se realizan pruebas de configuración y conectividad utilizando placas de evaluación de dos diferentes fabricantes, como son Rhom y Renesas, para probar la tecnología Wi-SUN, utilizando diferentes configuraciones, alejando los dispositivos para probar su cobertura y poniendo trabas a las comunicaciones para confirmar su correcto funcionamiento.

EUSKERA

Proiektu honen bitartez, Wi-SUN deituriko komunikazio-teknologia berri baten azterketa burutzen da, etorkizunean kontagailu adimendunetan ezartzeko, sare elektriko konbentzionalak sare adimendun bihurtzen lagunduz

Horretarako, lehenik eta behin, sare elektriko adimenduei aplikatutako gaur egungo komunikazio-teknologiaren inguruko ikerketa egiten da, eta teknologia berri honekin konparatzen dira.

Ondoren, teknologiaren alderdi bereizgarrienak deskribatzen dira eta haren egitura aztertzen da, osatzen duten protokoloak ezagutaraziz.

Azkenik, konfigurazio eta konektibitate probak egiten dira bi fabrikatzailearen ebaluazio-plakak erabiliz, hala nola, Rhom eta Renesas, Wi-SUN teknologia probatzeko. Horretarako, hainbat konfigurazio erabiltzen dira, gailuak urruntzen dira estaldura probatzeko, eta komunikazioei oztupoak jartzen zaizkie gailuak ondo funtzionatzen dutela egiaztatzeko.

INGLÉS

Through this project, an analysis of a new communications technology called Wi-SUN is carried out for its future implementation in smart meters, promoting the transformation of conventional electrical networks into smart grids.

To do this, first, an investigation is carried out around the different existing communications technologies applied to smart grids, comparing them with this new technology.

Then, the most characteristic aspects of the technology are described and its structure is analyzed, providing information about the different protocols of which it is composed

Finally, configuration and connectivity tests are carried out using evaluation boards from two different manufacturers, such as Rhom and Renesas, to test the Wi-SUN technology, using different configurations, moving the devices away to test their coverage and putting obstacles to communications to confirm their correct operation.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETO Y ALCANCE DEL TRABAJO	4
3. BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO	4
4. ESTADO DEL ARTE	4
4.1. REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES	4
4.2. EL INTERNET DE LAS COSAS (IoT)	5
4.3. ARQUITECTURA Y ELEMENTOS QUE COMPONEN LAS REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES	7
4.4. EL MODELO OSI	9
4.5. TÉCNICAS DE MODULACIÓN	11
4.5.1. MODULACIÓN POR PORTADORA ANALÓGICA	12
4.5.1.1. MODULACIÓN POR MÁS DE UNA PORTADORA	16
4.5.2. MODULACIÓN DE ESPECTRO ENSANCHADO	16
4.6. REQUERIMIENTOS DE LAS REDES DE COMUNICACIÓN	18
4.7. TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN EN LA MEDICIÓN INTELIGENTE	19
4.7.1. TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN ALÁMBRICAS	19
4.7.2. TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICAS	22
5. DESARROLLO TEÓRICO	29
5.1. CARACTERÍSTICAS Wi-SUN	29
5.1.1. ESTRUCTURA DEL PROTOCOLO Wi-SUN FAN	32
5.2. ESTANDAR IEEE 802.15.4- LOW RATE WIRELESS PERSONAL NETWORKS (LR-WPAN)	32
5.2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL	32
5.2.1.1. FUNCIONES GENERALES DE UN LR-WPAN	35
5.2.2. CAPA MAC	41
5.2.2.1. CAPA FÍSICA (PHY)	41
5.3. PROTOCOLO ICMPv6	43
5.4. PROTOCOLO DE ENRUTAMIENTO RPL	44
5.5. PROTOCOLO 6LOWPAN	46
5.6. PROTOCOLO UDP	47
5.7. PROTOCOLO TCP	47
5.8. ANTENAS	48
6. VERIFICACIONES EXPERIMENTALES MEDIANTE SIMULACIONES O ENSAYOS	51
6.1. COMUNICACIÓN ENTRE LAS PLACAS DE EVALUACIÓN DE ROHM	51
6.2. COMUNICACIÓN ENTRE LAS PLACAS DE EVALUACIÓN DE RENESAS	65
7. CONCLUSIONES	89
8. BIBLIOGRAFÍA	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema eléctrico actual vs sistema eléctrico futuro [1]	1
Figura 2. Evolución emisiones Europa 1990-2017 [3]	3
Figura 3. Infraestructura de Medición Avanzada [9]	7
Figura 4. Arquitectura de una red eléctrica inteligente [10]	8
Figura 5. Modelo OSI. Fuente: elaboración propia	10
Figura 6. Elementos principales de la modulación. Fuente: elaboración propia	12
Figura 7. Señales de modulación ASK: (a) señal moduladora, (b) señal modulada [14]	13
Figura 8. Señales de modulación FSK: (a) señal moduladora, (b) señal modulada [14]	13
Figura 9. Señales de modulación PSK: (a) señal moduladora, (b) señal modulada [14]	14
Figura 10. Señales de banda estrecha [19]	16
Figura 11. Señales de espectro ensanchado [19]	17
Figura 12. Tipos de redes inalámbricas [24]	23
Figura 13. Ejemplo red mallada [25]	24
Figura 14. Topologías de red del estándar IEEE 802.15.4 [31]	33
Figura 15. Red cluster tree [31]	34
Figura 16. Arquitectura del dispositivo LR-WPAN [31]	35
Figura 17. Estructura de la supertrama [31]	36
Figura 18. Estructura de los periodos activos con GTSs [31]	36
Figura 19. Esquema PPDU [31]	38
Figura 20. Trama de sincronización	38
Figura 21. Trama de datos	38
Figura 22. Trama de confirmación	38
Figura 23. Trama de control MAC	39
Figura 24. Comparación pila de protocolos 6LoWPAN vs IPv6 [32]	47
Figura 26. Formato de paquete A sin extensión	54
Figura 27. Formato de paquete A con 2 bytes de extensión	54
Figura 28. Formato de paquete A con 8 bytes de extensión	55
Figura 29. Formato de paquete B sin extensión	55
Figura 30. Formato de paquete B con 2 bytes de extensión	56
Figura 31. Formato de paquete B con 8 bytes de extensión	56
Figura 32. Configuración del nodo 0 para el primer ensayo	57
Figura 33. Configuración del nodo 1 para el primer ensayo	57
Figura 34. Configuración del nodo 0 para el segundo ensayo	58
Figura 35. Configuración del nodo 1 para el segundo ensayo	58
Figura 36. Configuración del nodo 0 para el tercer ensayo	59
Figura 37. Configuración del nodo 1 para el tercer ensayo	59
Figura 38. Configuración del nodo 0 para el cuarto ensayo	60
Figura 39. Configuración del nodo 1 para el cuarto ensayo	60
Figura 40. Configuración del nodo 0 para el quinto ensayo	60
Figura 41. Configuración del nodo 1 para el quinto ensayo	61
Figura 42. Configuración del nodo 0 para el sexto ensayo	61
Figura 43. Configuración del nodo 1 para el sexto ensayo	61
Figura 44. Configuración del nodo 0 para el séptimo ensayo	62
Figura 45. Configuración del nodo 1 para el séptimo ensayo	62
Figura 46. Configuración del nodo 0 para el octavo ensayo	63
Figura 47. Configuración del nodo 1 para el octavo ensayo	63
Figura 48. Configuración del nodo 0 para el noveno ensayo	64
Figura 49. Configuración del nodo 1 para el noveno ensayo	64
Figura 50. Componentes de MB-RA604S-02	65

Figura 51. Leds de MB-RA604S-02.....	65
Figura 52. Elementos Renesas	65
Figura 53. Pila de protocolos Wi-SUN FAN de Renesas	66
Figura 54. Topologías de red disponibles en la configuración de Renesas Wi-SUN Demonstrator	69
Figura 55. Prueba de topología estrella en el demostrador	73
Figura 56. Comunicación mediante el generador de tráfico con topología estrella	73
Figura 57. Prueba de topología cadena en el demostrador	73
Figura 58. Comunicación mediante el generador de tráfico con topología cadena	74
Figura 59. Prueba de topología diamante en el demostrador.....	74
Figura 60. Comunicación mediante el generador de tráfico con topología diamante.....	74
Figura 61. Prueba de topología cuello de botella en el demostrador	74
Figura 62. Comunicación mediante el generador de tráfico con topología cuello de botella.....	75
Figura 63. Comunicación entre dos nodos.....	75
Figura 64. Comunicación mediante el generador de tráfico del nodo 0 y nodo 1.....	75
Figura 65. Comprobación de comunicación a 6 metros entre el nodo 0 y nodo 1.....	76
Figura 66. Comprobación de comunicación a 6 metros entre el nodo 0 y nodo 2 situados en diferentes aulas	76
Figura 67. Comprobación de comunicación entre dos nodos con antenas	76
Figura 68. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 del nodo 1..	77
Figura 69. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 2 del nodo 1..	77
Figura 70. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 y Antena 2 del nodo 1	77
Figura 71. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 del nodo 0..	77
Figura 72. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 2 del nodo 0..	77
Figura 73. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 y Antena 2 del nodo 0	78
Figura 74. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 y Antena 2 del nodo 0	78
Figura 75. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 2 del nodo 0 y nodo 1	78
Figura 76. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 del nodo 0 y nodo 1	78
Figura 77. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 del nodo 1 y Antena 2 del nodo 0	78
Figura 78. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 y Antena 2 del nodo 1 y Antena 1 del nodo 0.....	79
Figura 79. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 y Antena 2 del nodo 1 y antena 2 del nodo 0.....	79
Figura 80. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 y Antena 2 del nodo 0 y Antena 1 del nodo 1.....	79
Figura 81. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 y Antena 2 del nodo 0 y Antena 2 del nodo 1.....	79
Figura 82. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando todas las antenas	80
Figura 83. Atenuar la señal metiendo un dispositivo en una caja metálica.....	81
Figura 84. Comprobación de comunicación mediante el generador de tráfico metiendo un dispositivo en una caja metálica.....	81
Figura 85. Atenuar la señal metiendo un dispositivo en una caja metálica y papel de aluminio.	81
Figura 86. Comprobación de comunicación mediante el generador de tráfico metiendo un dispositivo en una caja metálica y utilizando papel de aluminio	81
Figura 87. Atenuador fijo de 6 dB	82

Figura 88. Atenuador variable de 0-9 dB.....	82
Figura 89. Atenuador variable de 0-69 dB.....	83
Figura 90. Atenuador variable de 0-110 dB	83
Figura 91. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 10 dB en las antenas de uno de los dispositivos.....	84
Figura 92. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 15 dB en las antenas de uno de los dispositivos.....	84
Figura 93. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 19 dB en las antenas de uno de los dispositivos.....	84
Figura 94. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 21dB en la Antena 2 de uno de los dispositivos	85
Figura 95. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 69 dB en la Antena 1 de uno de los dispositivos.....	85
Figura 96. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 20 dB en cada antena.....	85
Figura 97. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 30 dB en cada antena.....	86
Figura 98. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 40 dB en cada antena.....	86
Figura 99. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 50 dB en cada antena primer intento	86
Figura 100. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 50 dB en cada antena segundo intento	86
Figura 101. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 60 dB en cada antena.....	87
Figura 102. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 70 dB en cada antena.....	87
Figura 103. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 80 dB en cada antena.....	87
Figura 104. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 90 dB en cada antena.....	87
Figura 105. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 100 dB en cada antena.....	87
Figura 106. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 110 dB en cada antena.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Objetivos de la Unión Europea [2].....	2
Tabla II. Comparación tecnologías BPL [9].....	20
Tabla III. Comparación tecnologías alámbricas e inalámbricas [9]	22
Tabla IV. Comparación tecnologías IoT.....	27
Tabla V. Especificaciones técnicas de Wi-SUN.....	30
Tabla VI. Estructura de Wi-SUN FAN [30].....	32
Tabla VII. Bandas de frecuencia y tasas de datos [31]	43
Tabla VIII. Modos S, T y C [33].....	52
Tabla IX. Modos S, T y C	52
Tabla X. Modos S, T y C.....	52
Tabla XI. Características de ML7406.....	53
Tabla XII. Características TX.....	53
Tabla XIII. Características RX.....	53
Tabla XIV. Ensayos con los dispositivos de Rhom	57
Tabla XV. Primer ensayo	57
Tabla XVI. Segundo ensayo.....	58
Tabla XVII. Tercer ensayo	59
Tabla XVIII. Cuarto ensayo	59
Tabla XIX. Quinto ensayo	60
Tabla XX. Sexto ensayo.....	61
Tabla XXI. Séptimo ensayo	62
Tabla XXII. Octavo ensayo	63
Tabla XXIII. Noveno ensayo	63
Tabla XXIV. Características TX.....	67
Tabla XXV. Características TX.....	67
Tabla XXVI. Firmware de los nodos.....	68
Tabla XXVII. Configuración de la capa física del Demonstrator.....	68
Tabla XXVIII. Configuración de la capa física del Wireshark.....	70
Tabla XXIX. Configuración Renesas Wi-SUN Demonstrator.....	71
Tabla XXX. Ensayos con los dispositivos de Renesas	71
Tabla XXXI. Resumen ensayos de comunicación quitando antenas.....	80

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

- **PNIEC:** Plan Nacional Integrado de Energía y Clima
- **IoT:** *Internet of Things*
- **AMR:** *Automatic Meter Reading*
- **AMI:** *Advanced Metering Infrastructure*
- **HAN:** *Home Area Network*
- **NAN:** *Neighbourhood Area Network*
- **WAN:** *Wide Area Network*
- **TIC:** Tecnologías de Información y Telecomunicación
- **OSI:** *Open System Interconnection*
- **ISO:** *International Standard Organization*
- **AM:** *Amplitude Modulation*
- **PM:** *Phase Modulation*
- **FM:** *Frequency Modulation*
- **ASK:** *Amplitude Shift Keying*
- **FSK:** *Frequency Shift Keying*
- **MFSK:** *Multiple frequency-shift keying*
- **GFSK:** *Gaussian frequency-shift keying*
- **PSK:** *Phase Shift Keying*
- **BPSK:** *Binary phase-shift keying*
- **QPSK:** *Quadrature Phase-Shift Keying*
- **O-QPSK:** *Offset Quadrature Phase-Shift Keying*
- **DPSK:** *Differential Phase Shift Keying*
- **DQPSK:** *Differential Quadrature Phase Shift Keying*
- **MPSK:** *M-ary Phase Shift Keying*
- **MSK:** *Minimum Shift Keying*
- **GMSK:** *Gaussian Minimum Shift Keying*
- **QAM:** *Quadrature Amplitude Modulation*
- **OFDM:** *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*
- **DSSS:** *Direct Sequence Spread Spectrum*
- **FHSS:** *Frequency Hopping Spread Spectrum*
- **PSSS:** *Parallel Sequence Spread Spectrum*

- **CSS:** *Chirp Spread Spectrum*
- **PLC:** *Power Line Communications*
- **UNB:** *Ultra Narrowband*
- **NB:** *Narrowband*
- **LDR:** *Low Data Rate*
- **HDR:** *High Data Rate*
- **BPL:** *Broadband over power lines*
- **RMU:** *ring main unit*
- **DC:** *data concentrator*
- **DER:** *distributed energy resources*
- **WBAN:** *Wireless Body Area Network*
- **WPAN:** *Wireless Personal Area Network*
- **WLAN:** *Wireless Local Area Network*
- **WMAN:** *Wireless Metropolitan Area Network*
- **WWAN:** *Wireless Wide Area Network*
- **GSM:** *Global System for Mobile communications*
- **GPRS:** *General Packet Radio Service*
- **UMTS:** *Universal Mobile Telecommunications System*
- **CDMA:** *Code-division multiple access*
- **EVDO:** *Evolution Data Optimized*
- **EDGE:** *Enhanced Data rates for GSM Evolution*
- **LTE:** *Long Term Evolution*
- **LPWAN:** *Low Power Wide Area Network*
- **LoRaWAN:** *Long Range wide Area Network*
- **CSS:** *Chirp Spread Spectrum*
- **LTE-M:** *Long Term Evolution for Machines*
- **3GPP:** *Third-Generation Partnership Project*
- **EPC:** *Evolved Packet Core*
- **NB-IoT:** *NarrowBand Internet of Things*
- **Wi-SUN FAN:** *Wireless Smart Ubiquitous Network Field Area Networks*
- **PKI:** *public-key infrastructure*
- **DOS:** *denial-of-service*

- **FAN:** *Field Area Network*
- **LLNs:** *Low-Power and Lossy Networks*
- **RPL:** *Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*
- **RF:** Radio Frecuencia
- **ICMP:** *Internet Control Message Protocol*
- **TCP:** *Transmission Control Protocol*
- **UDP:** *User Data Protocol*
- **LR-WPAN:** *Low-rate Wireless Personal Area Network*
- **GTS:** *guaranteed time slot*
- **CSMA-CA:** *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*
- **ED:** *Energy Detection*
- **LQI:** *Link quality indication*
- **FFD:** *full-function device*
- **RFD:** *reduced-function device*
- **PAN:** *Personal Area Network*
- **PPDU:** *PHY Protocol Data Unit*
- **CCA:** *clear channel assessment*
- **CAP:** *contention access period*
- **CFP:** *contention free period*
- **SAP:** *service access point*
- **FCS:** *frame check sequence*
- **UWB:** *ultra-wideband*
- **BPM:** *Burst Position Modulation*
- **IETF:** *Internet Engineering Task Force*
- **ROLL:** *Routing Over Low power and Lossy Networks*
- **OF:** *Objective Functions*
- **DAG:** *directed Acyclic Graph*
- **MRHOF:** *Minimum Rank with Hysteresis Objective Function*
- **ETX:** *Expected Transmission Count*
- **DODAG:** *Destination Oriented Directed Acyclic Graph*
- **DIO:** *DODAG Information Object*
- **DIS:** *DODAG Information Solicitation*

- **DAO:** *Destination Advertisement Object*
- **DAO-ACK:** *DAO Acknowledgement*
- **OCP:** *Objective Code Point*
- **MTU:** *Maximum Transmission Unit*
- **CRC:** *Cyclic Redundancy Check*
- **DFE:** *Directed Frame Exchange*
- **EDFE:** *Extended Directed Frame Access*

1. INTRODUCCIÓN

Los recursos de la tierra son limitados (como, por ejemplo, los combustibles fósiles) y el consumo descontrolado de estos, los procesos productivos convencionales y las distintas actividades realizadas por los humanos, han llevado al planeta a un estado crítico. De esta manera, se ha provocado un cambio climático que es necesario parar si se quiere salvar el planeta.

Por parte de la Unión Europea se han marcado unos objetivos basados en la reducción de emisiones de CO₂, el incremento del uso de las fuentes renovables en producción de energía y la mejora de la eficiencia energética, entre otros objetivos. Para conseguir dichos objetivos, se deben producir cambios en el sistema eléctrico, lo que se denomina como transición energética. En la figura 1 se puede observar una comparación entre el sistema eléctrico actual y el sistema eléctrico futuro.

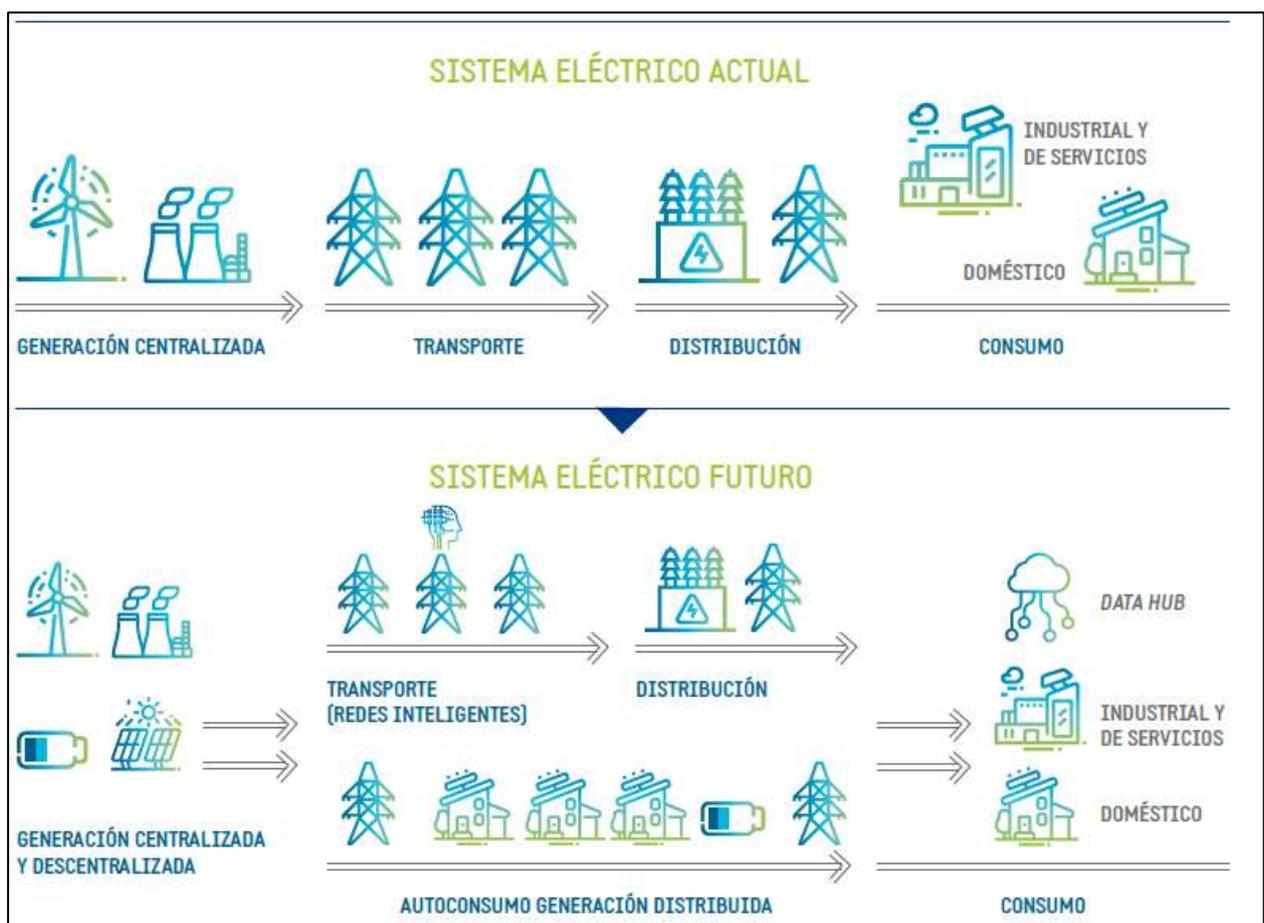


Figura 1. Sistema eléctrico actual vs sistema eléctrico futuro [1]

En la Tabla I. se pueden observar los objetivos de la Unión Europea a 2020, 2030, 2050 y los objetivos del PNIEC (Plan Nacional Integrado de Energía y Clima) a 2030.

Tabla I. Objetivos de la Unión Europea [2]

	OBJETIVOS 2020	OBJETIVOS 2030	OBJETIVOS 2050	OBJETIVOS PNIEC A 2030 (España)
Emisiones de gases de efecto invernadero	Reducción de emisiones de CO ₂ del 20% respecto a niveles de 1990	Reducción de emisiones de CO ₂ del 40% respecto a niveles de 1990	Reducción de emisiones de CO ₂ del 80-95% respecto a niveles de 1990	Reducción de emisiones de CO ₂ del 21% respecto a niveles de 1990
Energías renovables en el consumo de energía final	Penetración renovable del 20% en el consumo de energía final	Penetración renovable del 32% en el consumo de energía final (35% no vinculante)		Penetración renovable del 42% en el consumo de energía final y un 74% en generación eléctrica
Eficiencia energética	Incremento de la eficiencia energética en un 20%	Incremento de la eficiencia energética en un 32,5%		Incremento de la eficiencia energética en un 39,5%
Capacidad de interconexión	Capacidad de interconexión del 10%	Capacidad de interconexión del 15%		

El PNIEC 2021-2030, propuesto por el gobierno de España en febrero de 2019 y actualizado en enero de 2020, establece objetivos climáticos más ambiciosos que los mínimos establecidos por la Unión Europea (Tabla I). Esto supondrá la instalación de aproximadamente 60 GW adicionales en España.

El PNIEC identifica los retos y oportunidades a lo largo de las cinco dimensiones de la Unión de la Energía: la descarbonización (incluyendo la inyección de energías renovables), la eficiencia energética, la seguridad energética, el mercado interior de la energía y la investigación, la innovación y la competitividad. [2]

La descarbonización es el objetivo principal y para conseguirlo se debe tener en cuenta que esto implica no solo al sector eléctrico sino a otros muchos sectores. En la Figura 2 se pueden ver las emisiones de CO₂ de los diferentes sectores desde 1990 a 2017. Como se puede observar, alguno ha reducido sus emisiones, como, por ejemplo, el sector eléctrico, y otros las han aumentado, como es el caso del transporte.

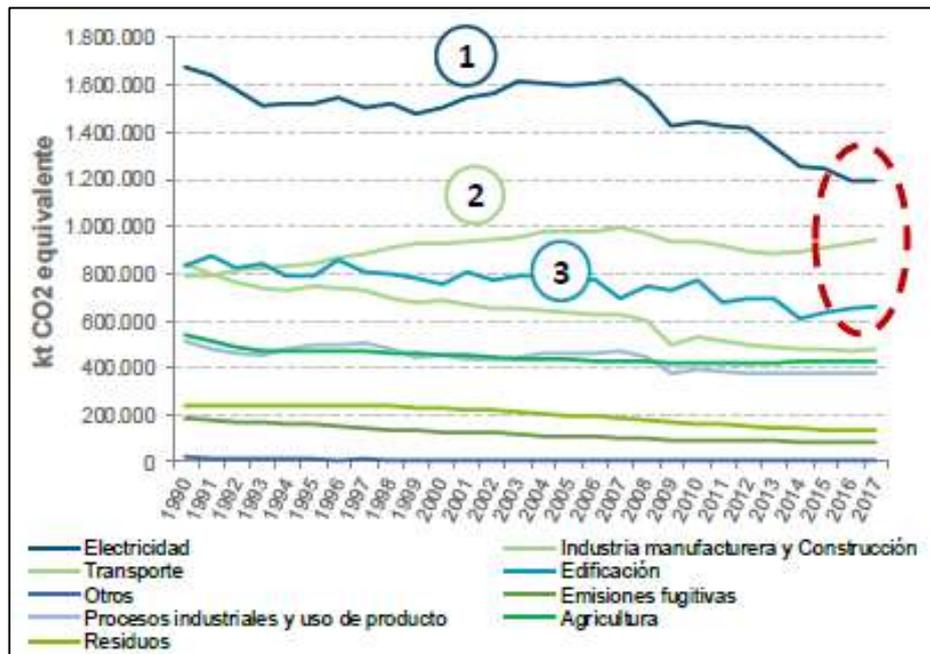


Figura 2. Evolución emisiones Europa 1990-2017 [3]

Como se ha nombrado anteriormente, estos objetivos suponen una modificación en el funcionamiento del sector eléctrico y afectan de alguna manera a todos los agentes que participan en él:

- Generación centralizada:

La generación se ve modificada ya que la generación renovable debe incrementar, disminuye también la operación de las centrales térmicas y se reduce la demanda centralizada (por la mejora de la eficiencia energética y el aumento de la generación distribuida).

- Transporte y distribución:

A diferencia de en las redes convencionales existen flujos multidireccionales, nuevos patrones de consumo, reducción de la necesidad de la red, operación del sistema más complejo...

- Comercio:

Menor demanda, más competencia de precios...

- *Metering*:

Uso de medidores inteligentes (*Smart Meters*) dando la posibilidad al consumidor de tener acceso a sus consumos.

En esta transición, las nuevas tecnologías juegan un papel importante, porque gracias a ellas se consigue transformar la red convencional en una red inteligente. [2]

2. OBJETO Y ALCANCE DEL TRABAJO

El objetivo de este proyecto es conocer la tecnología de comunicaciones Wi-SUN y valorar su implementación en las redes eléctricas inteligentes, para su uso en contadores inteligentes.

Para ello, se realiza un análisis de las diferentes tecnologías de comunicaciones existentes y una comparativa con esta nueva tecnología, valorando las ventajas que esta aporta. Y se analiza la estructura de Wi-SUN, describiendo los diferentes protocolos de los que se compone.

Por último, para estudiar su viabilidad se realizan tareas de configuración y pruebas de conectividad de la tecnología Wi-SUN, contando con equipos en forma de placas de evaluación de dos diferentes fabricantes, Rhom y Renesas.

3. BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

Mediante este trabajo se realiza una investigación alrededor de una tecnología nueva como es Wi-SUN, aplicable a las redes inteligentes. De esta manera, se valora su utilización en las redes inteligentes, concretamente en los medidores inteligentes, para mejorar el sistema eléctrico impulsándolo a la necesaria transición energética.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1. REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES

La plataforma tecnológica europea define la *Smart Grid* (red inteligente) como “una red eléctrica que puede integrar inteligentemente las acciones de todos los usuarios conectados a ella - generadores, consumidores y aquellos que hacen ambas cosas- para entregar eficientemente un suministro de electricidad sostenible, económico y seguro”.

Una de las diferencias que tienen las redes convencionales frente a las inteligentes, es que, las redes inteligentes proporcionan una comunicación bidireccional. Permitiendo de esta manera incluir al consumidor teniendo acceso a la información y herramientas necesarias para tomar decisiones sobre el uso de la energía (acceso a datos como la electricidad que se consume, cuando se utiliza y cuanto le cuesta a tiempo real).

Además, las redes inteligentes facilitan y mejoran la conexión y el funcionamiento de los generadores de todo tipo de tamaños y tecnologías. Se adaptan a todo tipo de generación residencial, la generación distribuida, las fuentes de energía renovable distribuida y opciones de almacenamiento, que implican una reducción del impacto ambiental del suministro del sistema eléctrico.

Son también capaces de mantener mayores niveles de seguridad, ya que una red inteligente podría alertar de problemas incluso antes de que se produjeran, permitiendo su reconfiguración inmediata y evitando interrupciones y además ofrece seguridad cibernética. Las *Smart Grids* consiguen una calidad de energía superior proporcionando una energía libre de caídas, picos, perturbaciones e interrupciones.

Por otro lado, los métodos de almacenamiento de energía, las tecnologías de envío de información y los sistemas de previsión que incorporan las *Smart Grids* hacen posible la integración de las energías renovables y su óptimo funcionamiento. Sin olvidarse del vehículo

eléctrico, que aparte de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector del transporte, también pueden aportar en el almacenamiento de la energía que puede ser consumida y gestionada por las *Smart Grids*. [4]

En general, los objetivos de las *Smart Grids* son:

- Lograr una red robusta y automática
- Optimizar la conexión de las zonas con fuentes de energía renovable
- Desarrollar arquitecturas de generación descentralizadas
- Mejorar la integración de la generación intermitente y de nuevas tecnologías de almacenamiento
- Avanzar en el desarrollo del mercado de la electricidad
- Gestión activa de la demanda
- Posibilitar la penetración del vehículo eléctrico

Para ello, se necesita de equipos y servicios innovadores además de nuevas tecnologías de comunicación, control, monitorización y autodiagnóstico. [5]

Se debe tener en cuenta que a la hora de implementar las *Smart Grids* existen una serie de limitaciones: las inversiones de empresas, la incertidumbre de estas de obtener los mismos beneficios que con las redes convencionales, las dudas respecto a la madurez de las tecnologías, los costes de inversión y operación o incluso la falta de concienciación.

Por ello, aunque existen algunas diferencias, la topología del sistema de energía eléctrica no ha cambiado aún. Hoy en día la red de suministro eléctrico se compone de un sistema jerárquico que sitúa a la entrega de energía en la capa inferior y a las centrales de generación en la capa superior. Además, la estabilidad del sistema ha disminuido en consecuencia del aumento de la demanda de energía y las pocas inversiones en nuevas infraestructuras. Tanto es así, que cualquier irregularidad de la red de distribución o cualquier aumento en la demanda de energía podrían dar lugar a fallos que pueden desencadenar en grandes apagones. Es por eso que, es importante comenzar la transición hacia la red inteligente y comenzar desde la red de distribución, puesto que la mayoría de las perturbaciones y cortes de energía tienen su origen en ella. [4]

4.2. EL INTERNET DE LAS COSAS (IoT)

Hoy en día, ya no son solo las personas las que se conectan a internet sino también los objetos, dispositivos, sensores y artículos de uso diario que nos rodean, que es lo que se denomina internet de las cosas (IoT, *Internet of Things*).

Además, en relación con las *Smart Grids*, el IoT influye directamente en la mejora de sus capacidades mejorando el procesamiento, la alerta, la autocuración, la recuperación y la fiabilidad de la red. La combinación de IoT y *Smart Grid*, favorece el desarrollo de terminales inteligentes, medidores y sensores, equipos de información y dispositivos de comunicación.

Mediante IoT se puede lograr una transmisión de datos fiable en las infraestructuras de comunicaciones alámbricas e inalámbricas en diferentes partes de la *Smart Grid*. Por ejemplo, controlar la generación, almacenamiento y consumo de energía y las emisiones de gas. Para vigilar y proteger las líneas de transmisión, las subestaciones y las torres, y gestionar y controlar los equipos. Y, también, en medidores inteligentes para obtener diferentes parámetros, en el consumo de energía inteligente, la interoperabilidad entre diferentes redes, la carga y descarga de vehículos eléctricos, la gestión de la eficiencia energética y la demanda de energía. [6]

En general, el IoT se aplica en el hogar, las ciudades, los automóviles, la salud, la agricultura y ganadería y la industria y el comercio:

- El hogar:

Electrodomésticos inteligentes, control y automatización de los sistemas del hogar, monitorización del estado de la casa...

- Las ciudades

Control y monitorización del tráfico, inspección de edificios y estructuras y sistemas inteligentes de alumbrado, de riego o recolección de basuras.

- Los automóviles

Para facilitar el mantenimiento de sus productos y aumentar la información que los usuarios reciben de sus automóviles.

- La salud

Control y tratamientos más eficientes, cuidado a personas mayores mediante dispositivos conectados que monitoreen sus signos vitales y avisen a sus médicos o familiares en caso de irregularidades...

- Agricultura y ganadería

Control preciso de la producción, control de las condiciones del suelo cultivado (como humedad y temperatura)....

- Industria y comercio

Optimizar la cadena de producción, facilitar el proceso de inventario, mejorar los mecanismos de distribución y abastecimiento, analizar el comportamiento de los consumidores...

Todas estas aplicaciones se pueden interconectar y así obtener beneficio de la integración de estos para conseguir nuevos datos que den lugar a más funcionalidades y servicios de mejor calidad. Para hacer realidad estas aplicaciones, existen diversas tecnologías de comunicaciones, que se desarrollarán a lo largo del documento

El avance actual de IoT, ha supuesto un incremento en el número de dispositivos conectados a internet. Todos estos dispositivos que quieren establecer una conexión a internet con el resto de la red global navegan con un número diferente conocido como dirección IP, y el número de direcciones IP está limitado por los protocolos. [7]

Actualmente, existen dos protocolos: IPv4 e IPv6. El protocolo IPv4 fue desarrollado en el año 1983 y se creía que disponía de una cifra suficiente de direcciones (más de 4000 millones de direcciones IP), pero con el auge de los dispositivos móviles y el desarrollo del IoT el número de dispositivos se disparó y se agotaron las direcciones.

Por ese motivo, el 6 de junio de 2012 se lanzó el protocolo IPv6 que permite para soportar todos los dispositivos que hay hoy conectados y habrá en los próximos años (340 sextillones de direcciones IP). [8]

4.3. ARQUITECTURA Y ELEMENTOS QUE COMPONEN LAS REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES

Las inversiones más recientes en infraestructuras se centran en la medición del sistema de distribución, como, por ejemplo, los sistemas de lectura automática de medidores (AMR, *Automatic Meter Reading*). Mediante esta tecnología, las empresas de servicios públicos acceden a información, como el estado de los locales de los consumidores, las alarmas y los registros de consumo, de manera remota. Pero esta tecnología no trata la gestión de la demanda, ya que es un sistema de comunicación unidireccional que se centra solamente en la lectura de datos. Es por eso que los sistemas AMR no son los adecuados para llevar a cabo la transición a la red inteligente.

En consecuencia, las empresas de servicios públicos han optado por las Infraestructuras de Medición Avanzada (AMI, *Advanced Metering Infrastructure*). Estas infraestructuras que sí permiten realizar una comunicación bidireccional, dan lugar a una gestión activa de la demanda, que implica la intervención directa de la distribuidora en cargas no prioritarias con el fin de mejorar la eficiencia energética y la estabilidad de la red. Pero las empresas de servicios públicos dudan de si las tecnologías de AMI serán o no compatibles con las tecnologías y topologías de la *Smart Grid* que aún no se han realizado. [4]

Como se puede observar en la Figura 3 los sistemas AMI se componen de dispositivos de medida (*Smart Meters*), concentradores de datos y un sistema de gestión de datos de medida.

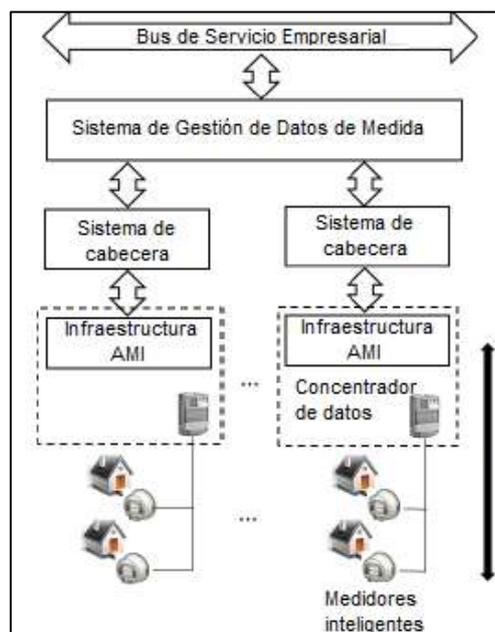


Figura 3. Infraestructura de Medición Avanzada [9]

El sistema de gestión de datos de medida, recoge los datos de los centros de distribución y los organiza en una base de datos. Los medidores, recogen los datos de medición para ser enviados a los concentradores de datos que, a continuación, los envían al sistema de gestión de datos de medida. [9]

En la red eléctrica inteligente se pueden distinguir dos niveles, el de energía y el de comunicaciones, que se ven reflejados en la Figura 4.

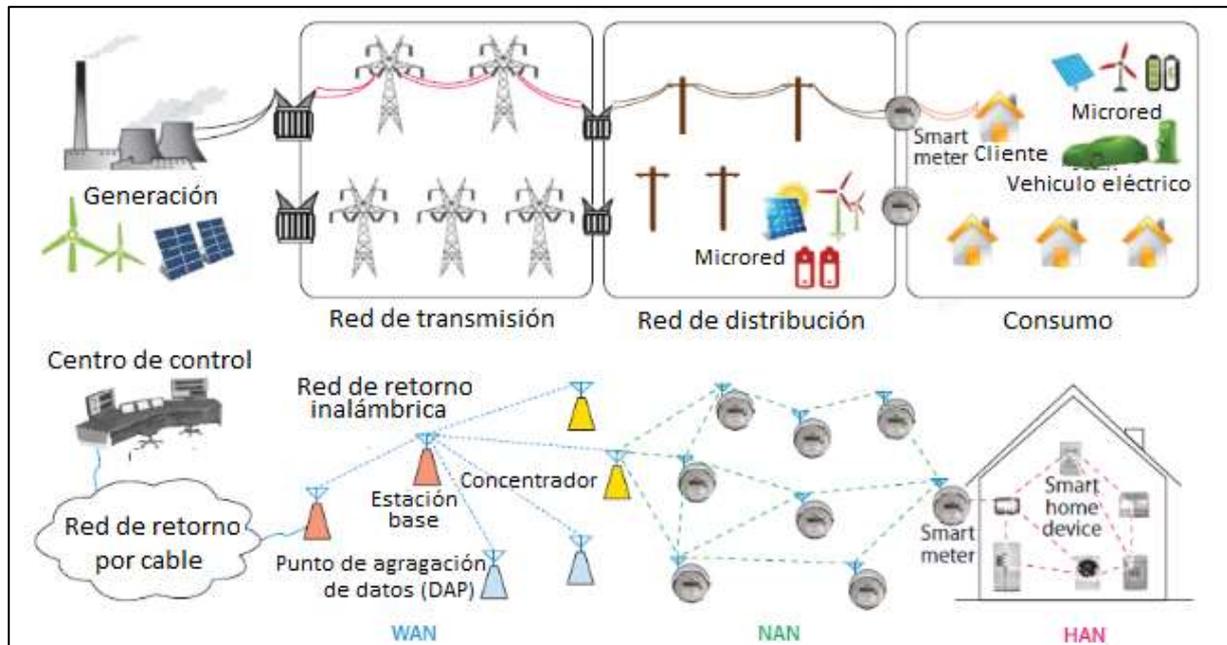


Figura 4. Arquitectura de una red eléctrica inteligente [10]

En el caso de la energía, se distinguen las etapas de generación, transporte, distribución y consumo. Teniendo en cuenta que en las redes eléctricas inteligentes la generación tiene una mayor penetración de energía renovable en la etapa de generación y en la etapa de distribución mediante la generación distribuida.

Para el caso de las comunicaciones, se combinan diferentes tecnologías que deben ser dotadas de interfaces bien definidas, por lo que se ha buscado la estandarización mediante los siguientes subniveles:

- HAN (*Home Area Network*):

Este primer subnivel tiene un corto alcance (1 - 100 m) que conecta dispositivos en el entorno de la vivienda o edificio e interactúa con los siguientes subniveles. Estas redes pueden estar conectadas a elementos auxiliares, fuentes de energía renovable y dispositivos de almacenamiento. Las HAN están formadas por contadores inteligentes y otros sensores.

- NAN (*Neighbourhood Area Network*):

En este subnivel, que tiene un alcance mayor que el anterior (100 m – 10 Km), se realiza el intercambio de la información de los contadores entre consumidores y compañías eléctricas. Estas redes ofrecen cobertura a varios edificios.

- WAN (*Wide Area Network*):

Es el subnivel más alto, que ofrece cobertura a un área más amplia (10 – 100 Km) y conecta todas las NAN y HAN. Es el nivel encargado de concentrar los datos para transmitirlos a las compañías eléctricas recorriendo largas distancias. En las WAN se suele encontrar el centro de control.

En las redes eléctricas inteligentes se ven implicadas varias tecnologías, como pueden ser: las Tecnologías de Información y Telecomunicación (TICs), que se refiere al conjunto de herramientas relacionadas con la transmisión, procesamiento y almacenamiento digitalizado de la información, los contadores inteligentes, los sensores y los sistemas de almacenamiento de energía. [10]

Uno de los elementos más importantes de las redes inteligentes es el contador inteligente. Puesto que, la combinación de estos dispositivos con la tecnología de comunicación bidireccional de información, el monitoreo y el control es lo que compone la nombrada infraestructura de medición avanzada.

Los contadores inteligentes son una nueva clase de medidores de energía, que permiten el envío de datos del consumo a su proveedor de energía de manera automática. Además, no solo facilitan la transferencia de esos datos reales al proveedor sino que también dan la posibilidad al consumidor de ser conocedor de su consumo a tiempo real y del costo que este supone. Los contadores inteligentes pueden ser de gas, agua y electricidad.

Gracias al contador inteligente las facturas de los consumidores son más precisas, pagando únicamente lo realmente consumido, sin estimaciones. No hay necesidad de acudir a los hogares de los consumidores para hacer una lectura de su medidor, reduciendo así los costes operativos de las compañías. Además, se consigue una mejor supervisión y gestión del consumo de energía con una base de datos en tiempo real. Y se puede utilizar la información para el planteamiento de la red y el control del fraude. [11]

4.4. EL MODELO OSI

La estandarización es necesaria para un entorno en el que existen gran cantidad de redes y tipos de dispositivos conectados a ellas. Ejemplo de ello es el modelo de referencia OSI (*Open System Interconnection*) que propuso la ISO (*International Standard Organization*) como estándar desde 1984.

Este modelo describe 7 capas de manera que una se basa en la anterior, pero no son necesarias todas ellas para formar un sistema de comunicación dependiendo de lo complejo que sea y a que se esté aplicando. Dentro de cada capa la comunicación se lleva a cabo siguiendo un protocolo. Además, entre las capas vecinas debe existir un interfaz que permita el intercambio de información. [12]

Las 7 capas del modelo OSI se representan en la Figura 5:



Figura 5. Modelo OSI. Fuente: elaboración propia

- **Capa 7: capa de aplicación:**

Es la capa del modelo OSI más cercana al usuario. A diferencia del resto de capas, esta no proporciona servicios a ninguna otra capa OSI, sino a aplicaciones fuera del modelo. La capa de aplicación establece la disponibilidad de los potenciales socios de comunicación y sincroniza y establece acuerdos sobre los procedimientos de recuperación de errores y control de la integridad de los datos.

- **Capa 6: capa de presentación:**

Esta capa, garantiza que la información que envía la capa de aplicación de un sistema pueda ser leída por la capa de aplicación de otro sistema. La capa de presentación es capaz de traducir entre varios formatos de datos utilizando un formato común.

- **Capa 5: capa de sesión:**

La capa de sesión establece, administra y finaliza las sesiones entre dos dispositivos que se están comunicando y sincroniza el diálogo entre las capas de presentación de los dos dispositivos. Esta capa tiene la capacidad para conseguir una eficiente transferencia de datos, clase de servicio y un registro de excepciones acerca de los problemas de la capa de sesión, presentación y aplicación.

- **Capa 4: capa de transporte:**

Esta capa se encarga de segmentar los datos originados en el dispositivo emisor y los reensambla en una corriente de datos dentro del sistema del dispositivo receptor. Mientras que las capas tres capas anteriores están relacionadas con asuntos de aplicaciones, las cuatro capas inferiores se encargan del transporte de datos. La capa de transporte intenta suministrar un servicio de transporte de datos que aísla las capas superiores de los detalles

de implementación del transporte. Esta capa establece, mantiene y termina adecuadamente los circuitos virtuales y se utilizan dispositivos de detección y recuperación de errores de transporte.

- Capa 3: capa de red:

Es una capa que proporciona conectividad y selección de ruta entre dos sistemas de dispositivos que pueden estar ubicados en redes geográficamente distintas.

- Capa 2: capa de enlace de datos:

Ofrece un tránsito de datos confiable a través de un enlace físico. Al hacerlo, la capa de enlace de datos se ocupa del direccionamiento físico, la topología de red, el acceso a la red, la notificación de errores, la entrega ordenada de tramas y el control de flujo.

- Capa 1: capa física:

Define las especificaciones eléctricas, mecánicas, de procedimiento y funcionales para activar, mantener y desactivar el enlace físico entre sistemas finales. Especifica características como, niveles de voltaje, temporización de cambios de voltaje, velocidad de datos físicos, distancias de transmisión máximas, conectores físicos y otros atributos similares. [13]

4.5. TÉCNICAS DE MODULACIÓN

La modulación es un proceso en el que la información se “imprime” sobre una señal de alta frecuencia, para alcanzar mayores distancias. A la señal que tenemos (voz, datos...) se le denomina señal moduladora, y mediante una señal portadora (de alta frecuencia) se modula obteniendo la señal modulada. La modulación puede ser analógica o digital.

Cuando se transmite una señal digital sin modulación (tal y como se genera) se dice que es transmitida en banda base, en cambio, si utiliza alguna técnica de modulación antes de transmitir se le denomina transmisión en banda ancha. La transmisión en banda ancha permite alcanzar distancias mucho mayores sin verse afectadas por el ruido. [14]

Como previamente se ha nombrado, en la modulación intervienen 3 señales que se definen a continuación y que se representan en la Figura 6:

- Señal portadora

Señal periódica encargada de transportar la información que se quiere transmitir, y cuya frecuencia es la frecuencia de transmisión deseada.

- Señal moduladora

Señal que representa el mensaje que deseamos transmitir, y cuya frecuencia en general no será la frecuencia de transmisión deseada. Esta señal modificara algún parámetro de la portadora.

- Señal modulada

Señal resultante de la modulación de una señal portadora por una señal moduladora.

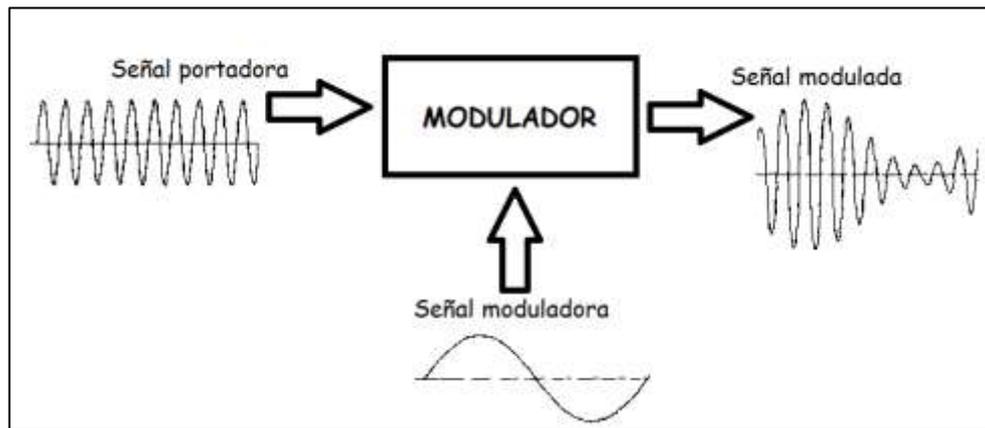


Figura 6. Elementos principales de la modulación. Fuente: elaboración propia

La modulación se puede clasificar según el tipo de señal (analógica o digital) y según el parámetro de la portadora que se modifique (amplitud, frecuencia y fase). En los siguientes subapartados, se definen diferentes modulaciones teniendo en cuenta esa clasificación. [15]

4.5.1. MODULACIÓN POR PORTADORA ANALÓGICA

- Modulación en amplitud (AM, *Amplitude Modulation*)

Una señal modulada en amplitud es una señal de una frecuencia fija cuya amplitud varía proporcionalmente a otra señal. Un sistema electrónico que multiplica la señal que desea transmitirse por la señal portadora, sumando al resultado la propia señal portadora, proporciona como resultado una señal modulada en amplitud.

Las características principales de la modulación AM son:

- El 50% de la potencia de la señal modulada se usa para transmitir la señal portadora, que no contiene información.
- La señal transmitida contiene información redundante, ya que transmite 2 veces el espectro de la señal moduladora.
- El ancho de banda de la señal modulada es el doble del ancho de banda de la señal en banda base.

- Modulación en fase (PM, *Phase Modulation*) y modulación en frecuencia (FM, *Frequency Modulation*)

Tanto a la modulación en fase como a la modulación en frecuencia se consideran modulaciones angulares, ya que es la fase o ángulo de la portadora lo que varía con el mensaje. En la modulación angular el espectro de la señal no está relacionado a simple vista con el espectro del mensaje.. [15]

- Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK, *Amplitude Shift Keying*)

La modulación ASK es un caso particular de la modulación en amplitud, siendo una técnica de modulación digital en la que la información se modula en amplitud, manteniendo constantes la frecuencia y la fase.

Los dos valores binarios (0 y 1) se representan con dos amplitudes diferentes. La forma más sencilla es que una de las dos amplitudes sea cero; es decir uno de los dígitos binarios se representa mediante la presencia de la portadora a amplitud constante, y el otro dígito se representa mediante la ausencia de la señal portadora, como se puede ver en la Figura 7.

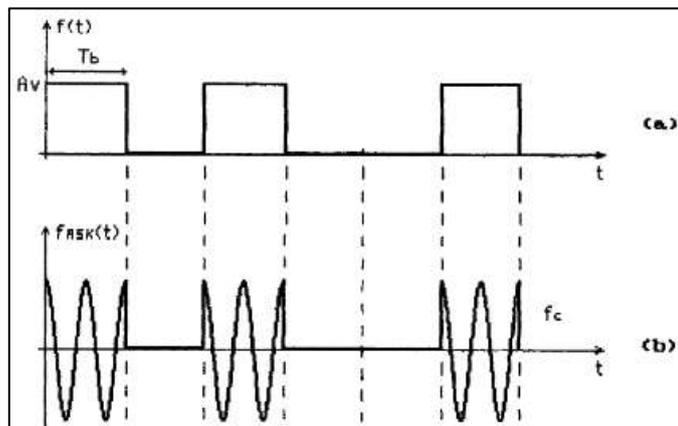


Figura 7. Señales de modulación ASK: (a) señal moduladora, (b) señal modulada [14]

- Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK, *Frequency Shift Keying*)

La modulación FSK es una técnica de modulación digital en la que la información se modula en frecuencia, sin variar amplitud y fase. Es decir, los valores binarios 0 y 1 se codifican con frecuencias diferentes.

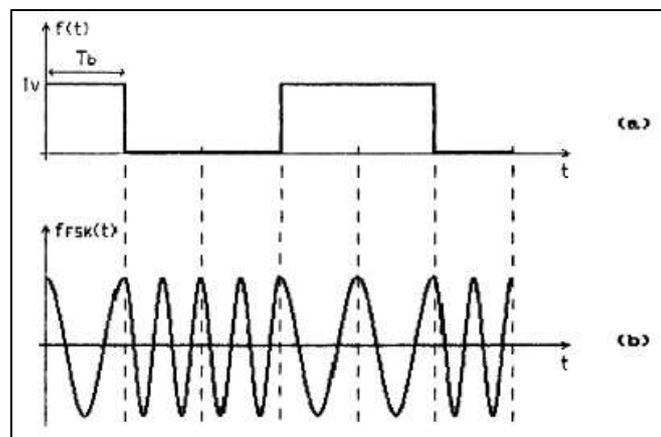


Figura 8. Señales de modulación FSK: (a) señal moduladora, (b) señal modulada [14]

Un uso más eficaz del ancho de banda, aunque más susceptible a errores, es el FSK múltiple o MFSK (*Multiple frequency-shift keying*), donde se usan más de 2 frecuencias portadoras. Con esta técnica cada elemento de señalización (cada tono simple en una frecuencia) representa más de 1 bit. [15]

Por otro lado, en la modulación Gaussiana FSK (GFSK, *Gaussian frequency-shift keying*) los datos se codifican en forma de variaciones de frecuencia en una portadora de manera similar a la FSK. Por lo tanto, el modulador utilizado puede ser el mismo que se utiliza para la modulación FSK. Sin embargo, los impulsos pasan a través de un filtro gaussiano antes de entrar en el modulador de impulsos para disminuir la anchura espectral del mismo. El filtro gaussiano es una especie de formateador de impulsos que se utiliza para suavizar la transición entre los valores de los impulsos. [16]

- Modulación por desplazamiento de fase (PSK, *Phase Shift Keying*)

La modulación PSK es una técnica de modulación digital en la que la información se modula en fase, es decir, dependiendo de los valores de la entrada digital, la señal analógica modulada va a tener una u otra fase de salida.

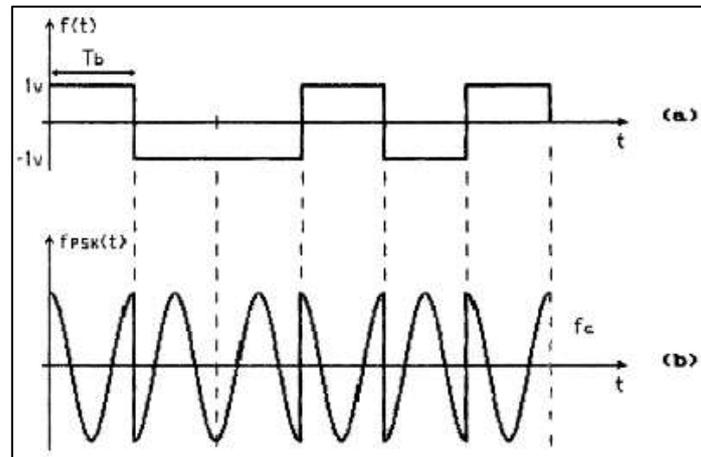


Figura 9. Señales de modulación PSK: (a) señal moduladora, (b) señal modulada [14]

La forma más simple de modulación PSK se denomina BPSK (Binary Phase Shift Keying) o PSK binaria o $\mathcal{2}$ PSK. Esta modulación utiliza dos puntos de modulación, cada uno de ellos con la misma amplitud y un desfase de 180° . De 0° a 360° para codificar un 0 binario y de 180° para codificar un 1 binario.

En el caso de la modulación por desplazamiento diferencial de fase (DPSK, *Differential Phase Shift Keying*), a diferencia de la modulación PSK, no trabaja con fases absolutas sino con cambios de fase en la señal de salida. Cuando se transmite un 1 lógico, no se produce cambio de fase en la señal analógica de salida ($+0^\circ$). Sin embargo, cuando se transmite un 0 lógico, en la señal de salida se producirá un cambio de fase de $+180^\circ$.

Por otro lado, la modulación por desplazamiento de fase cuadrifásica (QPSK, *Quadrature Phase-Shift Keying*) utiliza desplazamientos de 90 grados, y codifica dos bits en cada desplazamiento. Es una modulación PSK que se basa en cuatro puntos de modulación, que definen un ángulo de desfase determinado:

- Desfase de 45° : Codifica la secuencia digital "00".
- Desfase de 135° : Codifica la secuencia digital "10".
- Desfase de 225° : Codifica la secuencia digital "11".
- Desfase de 315° : Codifica la secuencia digital "01".

QPSK puede utilizarse tanto para duplicar la tasa de datos en comparación con un sistema de BPSK mientras se mantiene el mismo ancho de banda de la señal, o para mantener la tasa de datos de la BPSK pero reduciendo a la mitad el ancho de banda necesario.

De la misma forma que la modulación QPSK codifica dos bits con 4 desfases distintos posibles, la modulación 8-BPSK codifica 3 bits en cada valor de desfase con 8 posibles fasores. [15]

Existen otras variantes de modulación PSK como la modulación QPSK compensada (O-QPSK, *Offset Quadrature Phase-Shift Keying*). Tomar cuatro valores de la fase (dos bits) a la vez para construir un símbolo QPSK puede permitir que la fase de la señal salte hasta 180° a la vez. Cuando la señal se filtra de paso bajo, estos desplazamientos de fase dan lugar a grandes fluctuaciones de amplitud. Al compensar la sincronización de los bits "en-fase" (I) y "en cuadratura" (Q) por un período de bit, o medio período de símbolo, los componentes en fase y en cuadratura nunca cambiarán al mismo tiempo. De esta manera, se limitará el desplazamiento de fase a no más de 90° a la vez y proporciona fluctuaciones de amplitud mucho menores que en QPSK tradicional y se prefiere a veces en la práctica.

Otra variante de QPSK es la QPSK diferencial (DQPSK, *Differential Quadrature Phase-Shift Keying*). En esta modulación los desplazamientos de fase son de 0° , 90° , 180° , -90° correspondiente a los datos "00", "01", "11", "10".

Por último, MPSK (*M-ary Phase Shift Keying*) es otra de las extensiones de la modulación digital PSK en la que si la señal PSK tenía dos posibles fases de salida (absolutas) en MPSK la señal modulada tiene "M" fases posibles para una misma frecuencia portadora. Además, las señales analógicas MPSK tienen una amplitud constante. [14]

- Modulación por desplazamiento mínimo (MSK, *Minimum Shift Keying*)

Es un tipo de modulación por desplazamiento de frecuencia de fase continua, que proporciona eficiencia en el espectro y permite un funcionamiento eficiente del amplificador de potencia de radiofrecuencia.

Está codificado con bits alternantes entre los componentes de cuadratura, con el componente Q retrasado la mitad del periodo de símbolo (como en OQPSK). En MSK, la diferencia entre la frecuencia superior y la inferior es igual a la mitad de la tasa de bits. Por tanto, las formas de onda utilizadas para representar un 0 y un 1 difieren en la mitad de un período de la señal portadora.

MSK no tiene discontinuidades de fase y esto reduce significativamente el ancho de banda necesario con respecto a otras formas de modulación por desplazamiento de fase y frecuencia. Para superar este problema se utiliza a menudo la modulación por desplazamiento mínimo gaussiano (GMSK, *Gaussian Minimum Shift Keying*) que se basa en MSK. En esta modulación no hay discontinuidades de fase porque los cambios de frecuencia se producen en los puntos de cruce de la portadora cero. [17]

- Modulación de amplitud en cuadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*)

La QAM es una técnica de modulación digital en la que la información es modulada en amplitud (no constante) y fase conjuntamente. Tiene como entrada un flujo de datos binarios, el cual se divide en grupos de tantos bits como se requieran para generar N estados de modulación (cada grupo de m -bits genera estados de modulación). [14]

4.5.1. MODULACIÓN POR MÁS DE UNA PORTADORA

- Modulación por división ortogonal de frecuencia (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)

OFDM es una modulación que se basa en enviar la información modulando en QAM o en PSK de un conjunto de ondas portadoras de diferente frecuencia. Su principal ventaja frente a los esquemas de portadora única es su capacidad de hacer frente a condiciones severas del canal siendo muy robusta frente al multitrayecto, frente al desvanecimiento debido a las condiciones meteorológicas y frente a las interferencias de radiofrecuencia.

Gracias a las características de esta modulación, las diferentes señales que llegan al receptor con diferentes retardos y amplitudes contribuyen positivamente a la recepción. Es por eso que existe la posibilidad de crear redes de radiodifusión de frecuencia única sin que existan problemas de interferencia. [18]

4.5.2. MODULACIÓN DE ESPECTRO ENSANCHADO

El espectro ensanchado (también conocido como espectro expandido, espectro disperso, *spread spectrum* o SS) es una técnica de modulación empleada en telecomunicaciones para la transmisión de datos digitales y por radiofrecuencia.

Las señales moduladas con estas técnicas son difíciles de interferir, por lo que, un intruso sin acceso oficial nunca podrá descifrarlas. Estas señales de espectro extendido se transmiten a baja densidad de potencia y tienen una amplia difusión. A continuación, se pueden observar las diferencias entre las señales de banda estrecha y las de espectro ensanchado.

Las señales de banda estrecha tienen la intensidad de la señal concentrada como se muestra en la Figura 10. Esta banda de señales ocupa un estrecho rango de frecuencias, la densidad de potencia es alta y la dispersión de la energía es baja y concentrada. Por otro lado, estas señales son propensas a las interferencias.

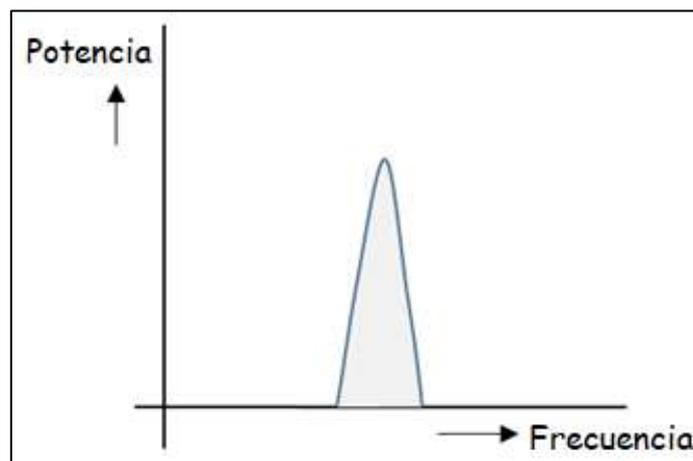


Figura 10. Señales de banda estrecha [19]

Las señales de espectro ensanchado tienen la intensidad de la señal distribuida como se muestra en la Figura 11 de espectro de frecuencias. Lo que hace es coger la señal de información de unos pocos kilohertz y distribuirlos en una banda que puede ser de muchos megahertz. En este caso,

la banda de señales ocupa un amplio rango de frecuencias, la densidad de potencia es muy baja y la energía está muy dispersa. Y al contrario que las señales de banda estrecha, presenta una alta inmunidad a las interferencias, que es su mayor ventaja. Como varios usuarios pueden compartir el mismo ancho de banda del espectro de dispersión sin interferir entre ellos, pueden denominarse técnicas de acceso múltiple.

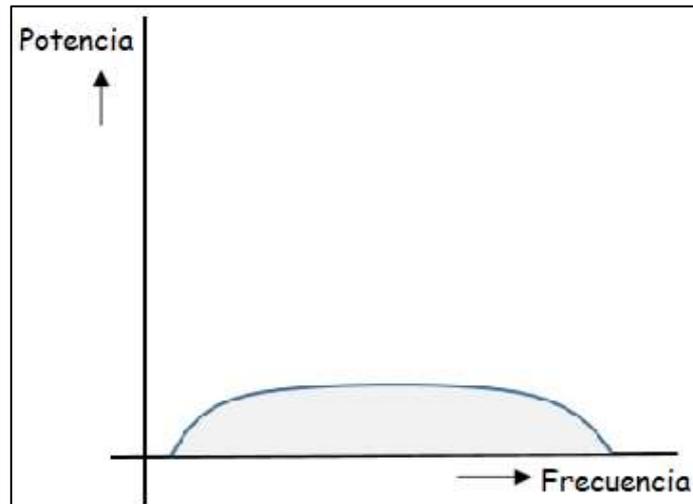


Figura 11. Señales de espectro ensanchado [19]

Las técnicas de acceso múltiple al espectro ensanchado utilizan señales que tienen un ancho de banda de transmisión de una magnitud superior al mínimo requerido de ancho de banda de radiofrecuencia. [19]

Se diferencian varios métodos de modulación de espectro ensanchado, algunos de ellos se desarrollan a continuación:

- Espectro expandido de secuencia directa DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*)

En esta técnica cada bit de la señal original se representa con varios bits en la señal transmitida utilizando un código de expansión, aplicándolo directamente a los datos para su propagación antes de la modulación de la portadora. Este código expande la señal dentro de un ancho de banda en proporción directa al número de bits utilizados. De este modo, un código de expansión de 10 bits expande la señal a una banda de frecuencias 5 veces más ancha que si se usa un código de expansión de 2 bits. Así, al generar una señal DSSS se utiliza un ancho de banda mucho mayor que el ancho de banda mínimo requerido para transmitir la información deseada

- Espectro expandido por salto de frecuencias (FHSS, *Frequency Hopping Spread Spectrum*)

El FHSS es una técnica de transmisión de señales de radio mediante la conmutación rápida de una portadora entre muchos canales de frecuencia, utilizando una secuencia pseudoaleatoria conocida tanto por el transmisor como por el receptor. Se coge la señal de transmisión y se modula con una señal portadora que realiza saltos de frecuencia en frecuencia en función del tiempo dentro de un ancho de banda asignado. El receptor capta el mensaje saltando de frecuencia sincronamente con el transmisor, y los receptores no autorizados escuchan una señal no inteligible.

Se reservan varios canales para la señal, existiendo 2^k frecuencias portadoras y en consecuencia 2^k canales. El espaciado entre portadoras, es decir, el ancho de banda de cada

canal, coincide con el de la señal de entrada. El emisor transmite varios bits en un canal con un intervalo fijo, utilizando algún sistema de codificación.

Una de las técnicas de modulación utilizada junto con FHSS es la MFSK. [15]

- Espectro expandido de secuencia paralela (PSSS, *Parallel Sequence Spread Spectrum*)

PSSS es una técnica de difusión que en su concepto original utiliza un conjunto de códigos de difusión paralelos casi ortogonales para codificar una secuencia de símbolos de datos. [20]

- Espectro expandido de chirrido (CSS, *Chirp Spread Spectrum*)

Es una técnica de espectro expandido que utiliza pulsos de chirrido (*chirp*) de banda ancha lineal de frecuencia modulada para codificar la información. Un *chirp* es una señal sinusoidal cuya frecuencia aumenta o disminuye con el tiempo. Los *chirps* se extienden también en los dominios temporales, lo que permite que la energía de estos se extienda en el tiempo para que las señales puedan mantener una baja potencia. [21]

4.6. REQUERIMIENTOS DE LAS REDES DE COMUNICACIÓN

La infraestructura de comunicación, maneja una importante cantidad de datos provenientes de múltiples dispositivos. Es por eso que se deben mantener unos niveles de latencia, fiabilidad, escalabilidad, seguridad, interoperabilidad y ubicuidad, que se definen a continuación [10]:

- Latencia:

La latencia es el tiempo que tarda en transmitirse un paquete dentro de una red. Teniendo en cuenta la cantidad de datos que se transmiten en entre los dispositivos, se necesita de una red que minimice los retardos en la recepción de la información.

- Fiabilidad:

Según IEEE, “la fiabilidad de un sistema es la probabilidad de que ese sistema funcione o desarrolle una cierta función, bajo condiciones fijadas y durante un período de tiempo determinado”. [22]

- Escalabilidad:

Es la habilidad de un sistema para funcionar bien cuando se presentan cambios en la demanda o en la carga del mismo. El sistema será capaz de ampliarse a un número mayor o más poderoso de servidores al incrementarse la demanda o la carga.

- Seguridad:

Se refiere a la forma en que el sistema es protegido de perder o suministrar información y la posibilidad de éxito de un ataque. La seguridad en las redes de comunicaciones debe tener en cuenta aspectos como la autenticidad y disponibilidad de los datos en momentos determinados y ser capaz de asegurar la privacidad y confidencialidad de la información.

- Interoperabilidad:

IEEE define interoperabilidad como “la habilidad de dos o más sistemas o componentes para intercambiar información y utilizar la información intercambiada”. [22]

- Ubicuidad:

Ubicuidad se refiere a la integración de dispositivos inteligentes a nuestro entorno permitiendo interactuar de manera natural con dichos dispositivos. Por tanto, se deben tener en cuenta todas las ubicuidades para permitir la comunicación de dispositivos situados a distancias considerables.

Se debe tener en cuenta también que en los subniveles nombrados en el apartado anterior se implementan diferentes tecnologías, ya que tienen diferentes requerimientos. Para el caso de HAN se requiere una baja tasa de datos, en NAN necesita de una capacidad de decenas de cientos de kbps y en el caso de WAN capacidades entre cientos de Mbps y Gbps. [10]

En la medición inteligente, los requerimientos del consumo eléctrico son bajas velocidades de transmisión con tasas de transferencia de entre 20-250 Kbps y distancias de cobertura de entre 10-150 m, con sensores cuyos transceptores sean de muy bajo consumo energético.

4.7. TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN EN LA MEDICIÓN INTELIGENTE

Las tecnologías de la información y la comunicación son un aspecto clave de las *Smart Grids* en general y de la infraestructura de medición avanzada en particular. El funcionamiento de AMI da lugar a una transferencia de datos entre los clientes y el servidor, por lo que la selección de una red de comunicación adecuada y el diseño de sus componentes son requisitos imprescindibles. Estas tecnologías pueden ser alámbricas o inalámbricas.

Además, las tecnologías de comunicación deben seleccionarse teniendo en cuenta su costo, ancho de banda (cantidad de datos que se pueden transferir entre dos puntos de una red en un tiempo específico que se mide en bits por segundo), alcance transmisible, características de seguridad y su impacto en la PQ. [23]

4.7.1. TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN ALÁMBRICAS

Las tecnologías alámbricas son aquellas que utilizan un soporte físico para enviar una señal.

La tecnología alámbrica más conocida es la comunicación por la línea eléctrica (PLC, *Power Line Communications*) que se clasifica en tres diferentes tecnologías según el ancho de banda:

- PLC de banda ultra estrecha (UNB-PLC, *Ultra Narrowband PLC*)

Para transmisiones de datos en frecuencias inferiores a 3 kHz. Debido a la gama baja de frecuencias, se ven menos afectadas por las pérdidas de transmisión y pueden alcanzar largas distancias. Son aplicables en secciones de media tensión y baja tensión. Ejemplos de esta tecnología son la tecnología X10 y el sistema de comunicación automática bidireccional Aclara. Esta última, es la tecnología líder de PLC de banda ultra estrecha para AMI.

El hecho de tener una baja velocidad, implica una gran desventaja y es una importante limitación en su aplicación.

- PLC de banda estrecha (NB-PLC, *Narrowband PLC*)

Para transmisiones de datos de entre 3 y 500 kHz, incluyendo la banda europea CENELEC (3 – 148,5 kHz), la banda estadounidense FCC (10 – 490 kHz), la banda japonesa ARIB (10 – 450 kHz) y la banda China (3 – 500 kHz). En esta tecnología se diferencian dos tipos: de baja velocidad de datos (LDR, *Low Data Rate*) y de alta velocidad de datos (HDR, *High Data Rate*).

Las tecnologías de baja velocidad de datos, se basan en modulaciones de una sola portadora y destacan las siguientes tecnologías por su importancia en los despliegues de AMI: *Open Smart Grid Protocol* que presenta una gran penetración en los países nórdicos y Rusia y *Meters and More* que se desplegó en el 100 % de los *Smart Meters* en Italia hace una década. El Operador del Sistema de Distribución Endesa también ha desplegado esta tecnología en España.

Las tecnologías de alta tasa de datos, se basan en modulaciones multiportadora y transmiten velocidades de datos de cientos de kbps que pueden alcanzar hasta 1 Mbps en la gama de frecuencias de hasta 500 kHz. Se diferencian las tecnologías PRIME y G3-PLC. PRIME es liderado por el operador del sistema de distribución Iberdrola. G3-PLC se convirtió en una norma con la referencia ITU-T G.9903. G3-PLC al igual que PRIME, utiliza OFDM para permitir un uso más eficiente del espectro; pero, se centra en aumentar la robustez de la comunicación por medio de la capa exterior de la codificación del canal.

- PLC de banda ancha (BPL, *Broadband over power lines*).

Para altas velocidades de datos en frecuencias desde 1 MHz hasta 250 MHz. Aplicable en baja y media tensión. Se diferencian diversas tecnologías, estas tecnologías y sus características se muestran en la Tabla II.

Tabla II. Comparación tecnologías BPL [9]

Tecnología/ estándar	OPERA	IEEE 1901	ITU-T G.hn	HomePlug AV	IEEE 1901.1- 2018 (SGPLC)	IEEE 1901.3 (IoTPLC)
Promotor	IBERDROLA DS2	IEEE	ITU-T	HomePlug	Huawei	Panasonic
Banda	2-7 MHz (<i>mode 1</i>) 8-18 MHz (<i>mode 2</i>)	2-60 MHz	2-100 MHz	2-30 MHz	<12 MHz	<100 MHz
Modulación	OFDM	FFT- OFDM Wavelet- OFDM	FFT- OFDM	OFDM	FFT- OFDM Wavelet- OFDM	Wavelet- OFDM
Velocidad de datos máx. PHY	Decenas de Mbps	500 Mbps	2 Gbps	200 Mbps	Decenas de Mbps	500 Mbps 1 Gbps (coaxial)

Las tecnologías PLC pueden ser aplicadas en *Smart Grids*, redes de interior y otras aplicaciones de larga distancia.

En el caso de las *Smart Grids*, están principalmente relacionadas con la distribución de electricidad y la comunicación entre los consumidores y las compañías eléctricas. Por ejemplo, los sistemas AMI, los sistemas de carga de vehículos eléctricos, las aplicaciones de telecontrol, las *Smart Cities*, los sistemas de generación distribuida...

Para las aplicaciones mencionadas se utilizan tecnologías NB-PLC y BPL, quedando excluida la tecnología UNB-PLC por su baja velocidad de datos. Estas tecnologías proporcionan datos a tiempo real a los dispositivos conectados a la red.

Concretamente, las soluciones NB-PLC y BPL pueden ser implementadas para:

- La gestión de subestaciones de media tensión
- Vehículos eléctricos y puntos de carga de vehículos eléctricos
- Unidades principales de anillo (RMU, *ring main unit*)
- Concentradores de datos (DC, *data concentrator*)
- Hogares inteligentes
- Fuentes de energía distribuida (DER, *distributed energy resources*)

El aumento de instalaciones de redes inteligentes ha supuesto el despliegue de esta tecnología, pero también existen ciertos problemas que pueden afectar a su correcto funcionamiento. Se debe tener en cuenta que las tecnologías PLC disponen de una infraestructura desplegada como es la red eléctrica, que está diseñada para la transmisión de energía, y no de datos. Es por eso que resulta un medio de comunicación duro. Tiene pérdidas de frecuencia, sus propiedades varían con la conexión y desconexión constante de las diferentes cargas, tiene interferencias electromagnéticas y una variedad de ruidos y emisiones no intencionales que generan aparatos convencionales (televisores, calderas), dispositivos de la generación distribuida, vehículos eléctricos o cargadores de baterías.

Uno de los problemas más significativos sería el ruido que generan los dispositivos eléctricos. Estos ruidos pueden bloquear la comunicación entre los medidores y los sistemas de cabecera y producir pérdidas de datos. Otros factores que afectan a las comunicaciones PLC son las cuestiones de seguridad relacionadas con la regulación en diferentes países, la interoperabilidad de las diferentes soluciones de PLC y la topología de red de cada país. [9]

En la Tabla III se pueden observar algunas de las ventajas y desventajas que comparan las tecnologías alámbricas (concretamente PLC) y las inalámbricas.

Tabla III. Comparación tecnologías alámbricas e inalámbricas [9]

Tecnología	VENTAJAS	DESVENTAJAS
PLC	<ul style="list-style-type: none"> - Amplia cobertura - Rentable - Infraestructura disponible 	<ul style="list-style-type: none"> - Atenuación (debilitamiento) de la señal - Alto nivel de ruido - Interferencias electromagnéticas - Dificultad de expansión (por la necesidad de cable)
Inalámbricas	<ul style="list-style-type: none"> - Rentable - Instalación rápida - Tecnología consolidada 	<ul style="list-style-type: none"> - Cobertura limitada - Capacidad - Seguridad - Incertidumbre

4.7.2. TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICAS

Las tecnologías de comunicación inalámbricas no necesitan soporte físico para transmitir información, siendo el propio espacio el soporte material a través del cual se comunica, concretamente, el aire. La información se transmite mediante ondas de radio.

Las tecnologías inalámbricas se pueden clasificar de acuerdo a su alcance en (ver Figura 12):

- Red de área corporal inalámbrica o WBAN (*Wireless Body Area Network*) que tiene una cobertura de 1-2 metros.
- Red de área personal inalámbrica o WPAN (*Wireless Personal Area Network*) que tiene una cobertura que no supera los 10 metros.
- Redes de área local inalámbricas o WLAN (*Wireless Local Area Network*) que cubren distancias de unos cientos de metros.
- Redes de área metropolitana inalámbrica o WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*) que son capaces de dar cobertura a una ciudad.
- Redes inalámbricas de área extensa o WWAN (*Wireless Wide Area Network*) que tienen capacidad para dar cobertura a toda una región. [24]

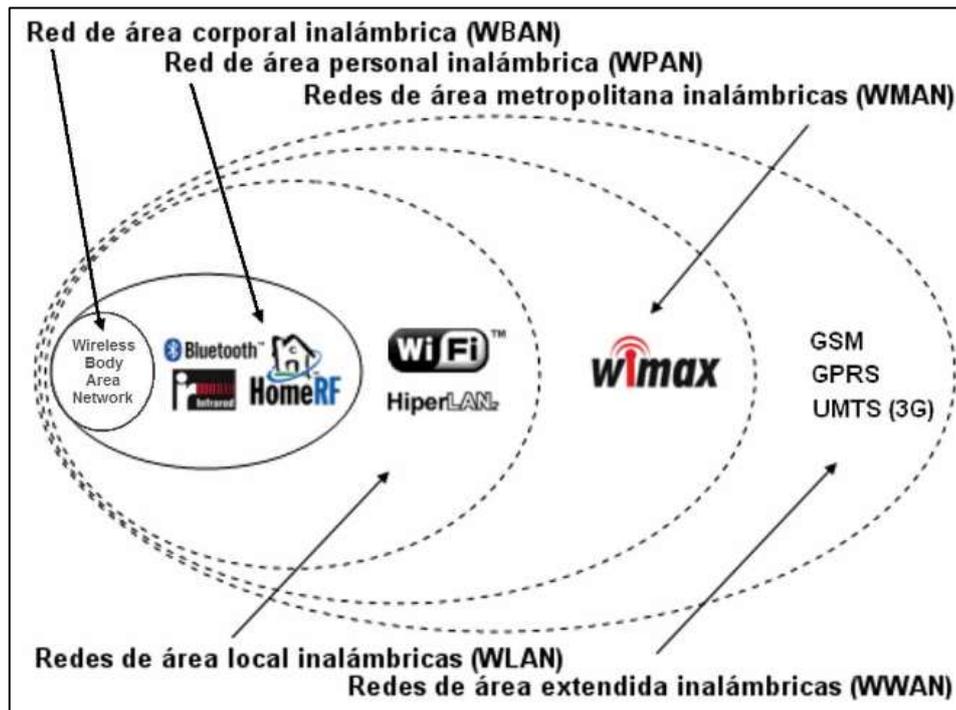


Figura 12. Tipos de redes inalámbricas [24]

A continuación, se describen las principales tecnologías aplicadas en la actualidad en las redes inteligentes, con énfasis en las aplicaciones de medición inteligente:

- ZigBee

Esta tecnología se ubica dentro de las redes WLAN. Es una tecnología inalámbrica que se utiliza mucho en las aplicaciones de medición inteligente y tiene sus capas PHY y MAC basadas en el estándar IEEE 802.15.4. Generalmente, se prefiere para el enlace de telecomunicaciones entre el medidor inteligente y el concentrador de datos en lugar de para el enlace entre el concentrador de datos y el centro de control. Funciona en la banda de 2,4 GHz y su alcance oscila entre 10 y 100 m, dependiendo de la potencia de salida y de las condiciones ambientales.

Es adecuado para aplicaciones con bajas tasas de datos y bajo consumo de energía y es apropiado para aplicaciones de control y monitoreo inalámbrico. Algunas aplicaciones típicas incluyen automatización de edificios y de viviendas, redes de sensores inalámbricos, iluminación inteligente, AMR... Además, ZigBee implica un bajo coste de implementación y una baja complejidad. En cuanto a las aplicaciones AMR, una de las ventajas de los medidores inteligentes en los que está integrado el protocolo ZigBee, es que pueden comunicarse fácilmente con dispositivos inteligentes en el hogar.

Por otro lado, esta tecnología experimenta una alta relación de interferencia de otras aplicaciones que utilizan el mismo ancho de banda, lo que podría causar la degradación del sistema.

El protocolo ZigBee también puede ser elegido para construir una malla inalámbrica. Los nodos pueden estar todos conectados entre sí, dando lugar a una topología totalmente enlazada o parcialmente conectada. En una red mallada cuando un nodo (el *Smart Meter*) falla, los datos de información pueden ser enviados a través de una ruta alternativa al destino, como se puede ver en la Figura 13.

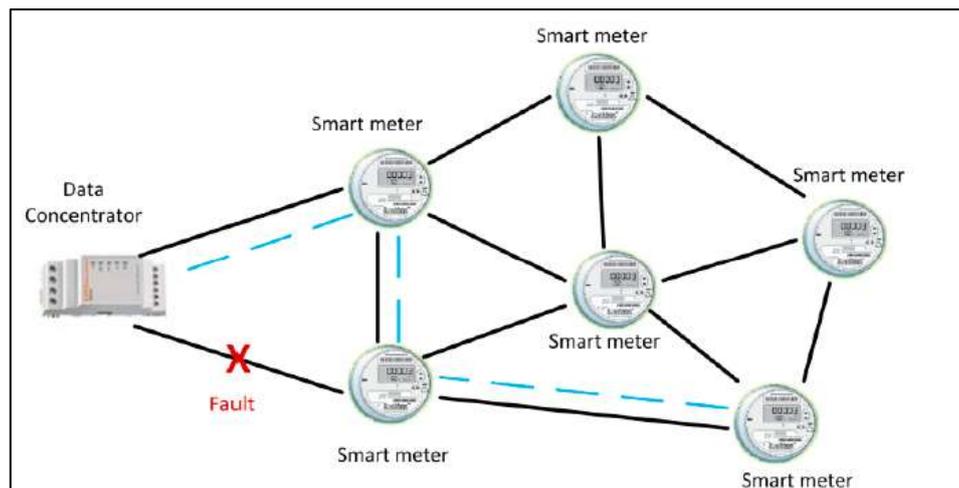


Figura 13. Ejemplo red mallasada [25]

- Tecnologías celulares-GSM/GPRS-3G-LTE

En este caso, se prefieren las tecnologías celulares en aplicaciones de medición inteligente para el enlace de telecomunicaciones entre el concentrador de datos y el centro de datos de la empresa de servicios públicos. Estas redes se clasificarían como redes WWAN.

Dos de estas tecnologías celulares son GSM (*Global System for Mobile communications*) y GPRS (*General Packet Radio Service*). Las bandas de frecuencias utilizadas en Europa son las de 900 y 1800 MHz. También se ha considerado la posibilidad de implantar el GSM para la supervisión y el control de la red eléctrica inteligente.

Su mayor ventaja es que la red ya existe, lo que le convierte en la solución más sencilla para las empresas de servicios públicos. Pero, por otro lado, esta red no fue diseñada para transportar datos de medición inteligente, sino datos de voz. Por lo que, el aumento del tráfico de datos de los medidores inteligentes junto con los servicios de datos de voz ya existentes podría convertirse en un gran problema. Además, las bandas GSM/GPRS se han atribuido en su mayor parte a los servicios móviles existentes; por lo tanto, es difícil obtener el espectro disponible para desarrollar una red dedicada a aplicaciones de medición inteligente.

En el caso de 3G, es la tercera generación de la tecnología de telecomunicaciones móviles. La velocidad de transmisión de datos debe ser de al menos 0,2 Mbps. Las dos normas principales que se considera que pertenecen a la categoría 3G son el UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) y el CDMA2000 (*Code-division multiple access*). Otros dos estándares son el EVDO (*Evolution Data Optimized*) y el EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*). La banda de frecuencias ocupada está entre 800 MHz y 1900 MHz para CDMA y EVDO. Además, la banda de 450 MHz puede utilizarse para aplicaciones CDMA.

En cuanto a las aplicaciones de medición inteligente, 3G puede utilizarse como enlace de comunicación entre el concentrador de datos y el centro de datos de la empresa de servicios públicos. La ventaja de esta tecnología es que ya está desplegada a gran escala, por lo que puede considerarse madura y estable.

Por último, la tecnología LTE (*Long Term Evolution*) es un estándar para las comunicaciones móviles de alta velocidad. Es la evolución de los estándares GSM/UMTS.

Su interfaz inalámbrica es incompatible con las redes 2G y 3G. Además, se utilizan diferentes bandas en diferentes países, lo que significa que los dispositivos compatibles con las normativas de un país pueden ser incompatibles con las de otro.

Las principales ventajas de esta tecnología son la baja latencia que ofrece, su alta capacidad y su bajo consumo de energía. Por el contrario, su principal inconveniente es que el coste de los equipos es elevado.

- WiMAX

Es un tecnología de comunicación inalámbrica WMAN, que proporciona una velocidad de datos de hasta 75 Mbps. Puede ser una tecnología alternativa para proporcionar acceso inalámbrico fijo de banda ancha. Se refiere a la familia de estándares IEEE 802.16 para redes inalámbricas y puede utilizarse como tecnología de respaldo para tecnologías de telefonía celular como GSM y CDMA.

Con respecto a las aplicaciones de red inteligente, puede ser una buena opción para conectar el concentrador de datos con el centro de control de la empresa de servicios públicos. Esta tecnología puede ser una solución adecuada para las empresas de servicios públicos, ya que implica bajos costes de implantación, un menor grado de complejidad y un control efectivo sobre las posibles aplicaciones. A pesar de las ventajas que ofrece, el hecho de que su ancho de banda deba ser compartido entre los usuarios supone un gran problema. [25]

- Red de área extendida de bajo consumo (LPWAN: *Low Power Wide Area Network*)

Hoy en día existen tecnologías emergentes que serían adecuadas para la realización del IoT, como lo son las LPWAN. Estas tecnologías son capaces de transmitir pocas cantidades de datos a grandes distancias y con un consumo de energía más bajo. Lo que da lugar a no utilizar este tipo de tecnología para transmisiones de datos constantes o para realizar llamadas, sino para interconectar dispositivos que requieren mucho menos ancho de banda: *Smart Cities*, industria, agricultura y ganadería, medicina, dispositivos personales...

Además, esta tecnología ofrece una larga duración de la batería, un bajo coste, una cobertura amplia y soporta un gran número de dispositivos.

Las principales tecnologías LPWAN son SigFox, LoRaWAN, LTE-M y NB-IoT. Las dos primeras son redes sin licencia (necesitan mecanismos de protección contra interferencias) y las dos últimas son redes con licencia. A continuación, se describen estas tecnologías:

- SigFox:

Esta tecnología usa un sistema similar a las redes celulares; sin embargo, está diseñado para ofrecer servicios a los dispositivos usando tecnología de banda ultra estrecha (UNB).

Utiliza bandas de radio sin licencia en el espectro de 868 MHz en el caso de Europa y 902 MHz en el caso de EEUU. Los dispositivos se conectan a las estaciones base mediante modulación BPSK. Utiliza UNB lo que le permite funcionar a velocidades de 10 a 1000 bps. Además, consume 50 μ W y tiene una cobertura de 40 km en ambientes rurales y 10 km en urbanos.

Su topología es en estrella, los dispositivos se conectan a las estaciones base que recopilan la información y la hacen llegar a la nube SigFox.

- LoRaWAN (*Long Range wide Area Network*):

Es un protocolo de red que usa la tecnología LoRa para comunicar y administrar dispositivos LoRa. LoRa es la capa física cuyo propietario es Semtech y LoRaWAN la capa de acceso al medio desarrollada por LoRa Alliance.

Es una especificación que utiliza la banda sin licencia, aunque puede operar en cualquier frecuencia por debajo de 1 GHz. Opera en las bandas de 433 MHz (Asia), 868 MHz (Europa), 915 MHz (EEUU). La modulación utilizada es CSS, las velocidades de datos que permite son desde 0,3 kbps a 5486 kbps. Y tiene un alcance de hasta 14 km.

Utiliza la topología de estrella de un solo salto, son redes fáciles de implementar y gestionar porque no necesitan elementos de enrutamiento.

- LTE-M (*Long Term Evolution for Machines*)

Es una tecnología de red móvil que reutiliza la red LTE. Se considera una tecnología complementaria de fácil implantación en dispositivos 2G, 3G y 4G. Además, permite la transmisión de imágenes, textos y voz. Fue estandarizada en 2016 por el Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3GPP: *Third-Generation Partnership Project*). Todo ello, permite una implantación fácil a un coste bajo.

Esta tecnología opera en las bandas de frecuencia LTE con licencia, alcanza velocidades de datos de 1,4 MHz, tiene una vida útil de 10 años y un alcance de 1 km en áreas urbanas y 5 km en suburbanas.

Su arquitectura se basa en la arquitectura de la red LTE, que se denomina EPC (*Evolved Packet Core*) con alguna optimización para soportar IoT.

- NB-IoT (*NarrowBand Internet of Things*)

Es una tecnología de banda estrecha diseñada para la IoT, que ha sido estandarizada por el organismo 3GPP y puede coexistir con GSM y LTE. Es capaz de soportar conexiones masivas ya que no comparte el espectro ni tiene restricciones del ciclo de trabajo.

Utiliza una técnica de modulación QPSK, si ancho de banda es de 200 kHz con velocidades de 100 kbps, tiene una vida útil de aproximadamente 10 años, y un alcance de 10 km en áreas suburbanas.

Como en el caso de LTE-M, también se basa en la arquitectura EPC de la red LTE, pero optimizándola para ser capaz de soportar la conexión masiva de dispositivos. [26]

- Wi-SUN FAN

Wi-SUN FAN (*Wireless Smart Ubiquitous Network Field Area Networks*) es una especificación abierta basada en la especificación IEEE 802.15.4. Wi-SUN FAN opera en espectro sin licencia, es decir, en las secciones del espectro de radiofrecuencia que no se venden bajo licencia.

Es un protocolo de red mallada, es decir, que cada dispositivo de una red puede hablar con sus vecinos, lo que permite que sus mensajes viajen a una distancia muy larga, saltando entre cada nodo de la red. A diferencia de las redes de malla de área personal de interiores, como ZigBee, Wi-SUN FAN fue diseñado específicamente para una escala mucho mayor de

puntos finales que permitirán superar distancias mucho mayores al aire libre. Además, puede adoptar un enfoque híbrido, utilizándola topología de malla (cada nodo está conectado a todos los nodos siendo posible llevar los mensajes de un nodo a otro por distintos caminos) para redes densas, como los medidores inteligentes en un vecindario, y luego una topología en estrella (se dispone de un nodo central y todas las comunicaciones se hacen necesariamente a través de ese nodo) para enlazar los activos desplegados en el área.

Wi-SUN FAN es una red auto-formable, lo que hace que añadir nuevos dispositivos a una red sea fácil, y auto-reparable, de modo que, si una ruta falla, la red se redireccionará automáticamente a otra.

Los tres protocolos que son más aplicables a los servicios públicos, ciudades inteligentes e IoT son Wi-SUN FAN, LoRaWAN y NB-IoT. Comparando estas tecnologías se llega a la conclusión de que Wi-SUN FAN es una buena opción para IoT.

Wi-SUN FAN tiene un mayor rendimiento que LoRaWAN y NB-IoT, en despliegues convencionales, con la capacidad de proporcionar una respuesta más rápida y una menor latencia de red para aplicaciones de comando y control. Wi-SUN FAN utiliza menos potencia al “dormir” y “escuchar” y los dispositivos pasan menos tiempo en el aire, lo que equivale a un mejor uso de la energía.

En la Tabla IV se comparan las tres tecnologías mencionadas en cuanto a la velocidad de datos y la latencia.

Tabla IV. Comparación tecnologías IoT

Red IoT	Velocidad de datos	Latencia
Wi-SUN FAN	>300 Kbps	0,02-1 s
LoRaWAN	300 bps – 62,5 Kbps	1 – 16 s
NB-IoT	Hasta 140 Kbps de subida Hasta 80 Kbps de bajada	2 – 10 s

En cuanto a aspectos de seguridad, siendo un aspecto importante en IoT, se debe tener en cuenta que Wi-SUN FAN dispone de su propia infraestructura de clave pública (PKI, *public-key infrastructure*), que le proporciona capacidades de certificación de seguridad para cada dispositivo de la red. De esta manera, se asegura que los dispositivos no serán reprogramados maliciosamente, certificando que las actualizaciones del firmware son válidas.

Otra característica destacada es el soporte para IPv6, y todas las características de seguridad de red asociadas utilizado en el ecosistema de redes de internet (detección de intrusos, modelado de tráfico, análisis de redes, pruebas de penetración...). Esto permite a Wi-SUN FAN mitigar mejor los ataques de denegación de servicio (DOS, *denial-of-service*), y también mantener la visibilidad de la red hasta los dispositivos finales, mejor que las otras tecnologías, aunque en ellas existen formas de hacerlo, pero es mucho más fácil en Wi-SUN FAN.

En lo que a ecosistema se refiere, debe proporcionar una gran cantidad de productos interoperables para su uso en la aplicación IoT correspondiente. En el caso de Wi-SUN, Wi-SUN Alliance se conforma de más de 250 empresas (proveedores de silicio y productos, proveedores de software, empresas de servicios públicos, instituciones académicas, agencias gubernamentales y organizaciones reguladoras). Cada miembro contribuye al ecosistema, mediante pruebas y programas de certificación para la interoperabilidad de múltiples proveedores. Además, las redes compatibles con Wi-SUN Alliance cuentan con 10 años de

experiencia en entornos de proveedores mixtos. En el caso de LoRaWAN, LoRa Alliance cuenta con más de 400 miembros, pero no está claro cuán interoperables son los productos de cada miembro dentro de ese ecosistema. Esto se complica por la presencia en el mercado de dispositivos LoRa privados. Por último, para el caso de NB-IoT, todavía no dispone de un ecosistema desarrollado. Como estándar 3GPP, no hay ninguna barrera práctica para que llegue a ser tan vibrante como el resto del sector LTE, pero parece haber un patrón emergente de NB-IoT chino frente al resto del mundo.

Por otro lado, los protocolos LPWAN han permitido el despliegue de dispositivos alimentados por baterías que pueden durar varios años. Sin embargo, la elección del protocolo, combinada con sus requisitos de frecuencia de mensajes, dictará si se alcanzan los tres o diez años con una batería. El menor consumo de energía a menudo implica un compromiso en la funcionalidad, pero con Wi-SUN Alliance, este no es a menudo el caso. Los dispositivos Wi-SUN FAN pueden diseñarse para una comunicación frecuente (a partir de intervalos de 10 s) de baja latencia, con una corriente de menos de 2 μA en “reposo”, 8 mA cuando “escucha” y menos de 14 mA cuando envía. Para el caso de LoRaWAN, sus dispositivos suelen estar diseñados para la comunicación no frecuente (>128 s), consumiendo 2 μA en “reposo” y 12 mA cuando “escucha”. Y los dispositivos NB-IoT están diseñados para comunicaciones poco frecuentes, pero con un consumo de energía mucho mayor. Su corriente máxima es de 120 a 300 mA, con una corriente de sueño de alrededor de 5 μA .

Otro aspecto que se debe considerar es la capacidad de hacer crecer una red, es decir, la escalabilidad. Wi-SUN puede escalar tanto en capacidad como en tamaño, ya que su mayor ancho de banda facilita la adición de aplicaciones con mayor cantidad de datos en el futuro. La fiabilidad mejora a medida que se añaden más nodos, con una serie de redes compatibles con Wi-SUN FAN de varios millones de dispositivos. Wi-SUN FAN funciona bien en despliegues urbanos y rurales. Para el caso de LoRaWAN su expansión puede requerir nuevas puertas de enlace y entornos urbanos con muchos dispositivos la interferencia podría ser un desafío significativo. En NB-IoT los despliegues de los operadores de redes móviles son su mayor factor limitante. Los clientes tendrán que esperar a que se complete la cobertura, y la experiencia con 3G y 4G ilustra que esto puede ser lento y desigual.

Por último, en lo que a longevidad de la red y de los dispositivos se refiere, Wi-SUN FAN despliega un hardware diseñado para un ciclo de vida de aproximadamente 15-20 años. LoRa Alliance afirma que sus dispositivos funcionan durante 10 años, al igual que NB-IoT.

Gracias al IoT las ciudades, los servicios públicos y las empresas pueden gestionar mejor los activos, las operaciones y los entornos empresariales, como la medición inteligente y la automatización de la red eléctrica inteligente, el alumbrado público y el control del tráfico de la ciudad. Esta tendencia se está acelerando y, teniendo en cuenta que hay empresas que aún no han dado sus primeros pasos, es importante tener en cuenta las opciones tecnológicas clave del sector, y para aplicaciones IoT Wi-SUN FAN es la mejor opción. [27]

5. DESARROLLO TEÓRICO

5.1. CARACTERÍSTICAS Wi-SUN

Wi-SUN es un estándar de comunicación inalámbrica que posibilita la conectividad perfecta entre los dispositivos de la red inteligente. El estándar alimenta redes IoT a gran escala en exteriores como las redes de malla inalámbricas para AMI, la gestión de la energía doméstica, la automatización de la distribución y otras aplicaciones de redes exteriores a gran escala, incluidas las redes FAN (*Field Area Network*) y las HAN. [28]

La red de área de campo Wi-SUN (Wi-SUN FAN) es una de las especificaciones técnicas de Wi-SUN que vincula los dispositivos de utilidades inteligentes en la infraestructura de medición avanzada (AMI) y la automatización de la distribución con el despliegue de la nube. Con el soporte del protocolo de internet versión 6 (IPv6), el protocolo de mensaje de control de internet para IPv6 (ICMPv6, *Internet Control Message Protocol for IPv6*), y el protocolo de enrutamiento para redes de baja potencia y pérdida (LLNs, *Low-Power and Lossy Networks*) que denomina RPL (*Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*) en la capa de red, el sistema Wi-SUN FAN es capaz de realizar comunicaciones multisalto (*multi-hop*) en más de 10 millones de puntos finales que operan en LLNs. [20]

Wi-SUN FAN se basa en una red de malla, que permite a los dispositivos tener múltiples conexiones con los que están a su alrededor. Esto permite que los equipos de la red transmitan datos a través de múltiples enlaces redundantes y mejora la fiabilidad. Si un dispositivo pierde el contacto con otro, puede simplemente enviar sus datos de una manera diferente. También presenta una latencia más baja y un mayor ancho de banda que sus competidores, lo que lo convierte en una sólida opción para las redes inalámbricas de IoT a gran escala. [28]

Esta tecnología de comunicación inalámbrica se basa en el estándar IEEE 802.15.4 para la capa física (PHY) y para la capa MAC. La capa PHY es responsable de gestionar el hardware que modula y demodula los bits de radiofrecuencia (RF). Mientras que la capa MAC es responsable de enviar y recibir tramas RF.

Una de sus grandes ventajas sería que esta tecnología puede ser implementada con niveles muy bajos de consumo de energía en comparación con otras comunicaciones inalámbricas.

Wi-SUN también proporciona una certificación para el perfil de comunicaciones de HAN, un estándar inalámbrico interoperable y escalable de baja potencia para las redes de área doméstica, que soporta la comunicación entre los sistemas de gestión de energía doméstica y cualquier dispositivo HAN.

En la Tabla V se puede observar el resumen de las especificaciones técnicas de Wi-SUN, como su cobertura, frecuencias, velocidad de datos, latencia, eficiencia energética y escalabilidad.

Tabla V. Especificaciones técnicas de Wi-SUN

Cobertura	Hasta 4 km
Frecuencia	- 868 MHz (EU) - 915 MHz (EE. UU) - Bandas ISM de 2,4 GHz
Velocidad de datos	Hasta 300 kbps
Latencia	0,02 s
Eficiencia energética	- < 2 uA en reposo - 8 mA cuando escucha
Escalabilidad	- Hasta 5000 dispositivos - decenas de millones de <i>endpoints</i>

La Wi-SUN Alliance desarrolló y promueve la especificación, y gestiona el proceso de certificación asegurando que los dispositivos de múltiples proveedores se ajusten a la especificación y cumplan los requisitos de interoperabilidad. Esta alianza es un consorcio de corporaciones globales y líderes mundiales en *Smart Utility*, *Smart City* y mercados de IoT y se formó para mejorar las redes de servicios públicos utilizando la tecnología inalámbrica de banda estrecha.

Esta alianza desarrolla un programa sólido de pruebas y certificación para asegurar que los productos de diferentes fabricantes que implementan la especificación Wi-SUN funcionen conjuntamente. Aparte de eso, Wi-SUN Alliance también es un respaldo para los vendedores y una forma de garantía para los clientes. Además, reduce el ciclo de pruebas y aprobación sobre el terreno que un proveedor podría tener que realizar con un cliente para probar la calidad de su equipo.

La Alianza Wi-SUN tiene como miembros a muchas organizaciones mundiales y nacionales de Australia, Brasil, Canadá, China, Europa, India, Japón, Corea, Singapur y Estados Unidos. Cuenta con más de 250 empresas miembros que han lanzado colectivamente más de 150 productos certificados Wi-SUN. Y trabaja con empresas de la industria para construir un ecosistema global de miembros que incluyen servicios públicos, gobierno, academia, expertos en redes inalámbricas y fabricantes de semiconductores. Este ecosistema pone a la Alianza Wi-SUN por delante de cualquier otra especificación de redes inalámbricas porque ofrece los siguientes beneficios:

- Seguridad:

Ofrece seguridad cibernética de grado empresarial para evitar que los dispositivos comprometidos se utilicen para montar ataques en otras redes y para interrumpir los servicios esenciales.

- Escalabilidad

El hecho de tener decenas de millones de puntos finales (*endpoints*) conectados de manera fiable mediante una red Wi-SUN, demuestra su capacidad para lograr la ubicuidad y la escalabilidad que exigen muchos proveedores de servicios de IoT.

- Resistencia

La alianza afirma que las redes Wi-SUN ofrecen resistencia contra fallas e interferencias, como la dificultad de interrumpirlas mediante un ataque de denegación de servicio.

- Adaptabilidad

Wi-SUN se adapta al paisaje y al entorno a medida que evoluciona, de modo que la red puede redirigirse alrededor de un edificio de gran altura u optimizar las rutas de transmisión de datos. [28]

En general, esta tecnología aporta las siguientes ventajas que hacen de ella una buena elección a la hora de elegir entre diferentes tecnologías de comunicación:

- Valor añadido

Cuando un cliente compra un dispositivo con la certificación Wi-SUN FAN, está comprando no sólo el compromiso de un vendedor con el producto, sino muchos. Los dispositivos certificados fomentan una comunidad más amplia de usuarios seguros, y con ello a aquellos que desean desarrollar aplicaciones ricas en características para una plataforma con un gran mercado de direcciones.

- Elección

Una amplia gama de soluciones, todas garantizadas como interoperables, ofrece al comprador la posibilidad de elegir entre fabricantes de productos que se ajusten a sus requisitos comerciales y técnicos.

- Costo

Una comunidad extendida trae consigo economías de escala porque los vendedores pueden vender más equipo a un costo menor.

- Flexibilidad

Una amplia comunidad de vendedores aporta una gran experiencia, lo que facilita y abarata la construcción de una diversa gama de aplicaciones para redes inteligentes de ciudades y servicios públicos. Esto apoya la necesidad del cliente de una red a prueba de futuro que apoye los casos de uso tanto conocidos como desconocidos. [29]

5.1. ESTRUCTURA DEL PROTOCOLO Wi-SUN FAN

Wi-SUN FAN se constituye de diferentes capas en el modelo de referencia OSI. En la Tabla VI se pueden ver estas capas de la 1 a la 4 y los protocolos de cada una de ellas:

Tabla VI. Estructura de Wi-SUN FAN [30]

Capa	Protocolos	
Capa 4	Transporte	UDP/TCP
Capa 3	Red	IPv6/ICMPv6/RPL/6LoWPAN
Capa 2	LLC	L2MESH
	MAC	IEEE 802.15.4
Capa 1	Física	

La capa física y la subcapa MAC adoptan el IEEE 802.15.4. La capa de red adopta el IPv6, el ICMPv6, el RPL y el 6LoWPAN (IPv6 sobre redes de área personal inalámbricas de baja potencia). La capa de transporte adopta el protocolo de datagramas de usuario (UDP, *User Data Protocol*) y el protocolo de control de transmisión (TCP, *Transmission Control Protocol*). [30]

5.2. ESTANDAR IEEE 802.15.4- LOW RATE WIRELESS PERSONAL NETWORKS (LR-WPAN)

Como ya se ha nombrado previamente, Wi-SUN se basa en el estándar IEEE 802.15.4 para la capa física (PHY) y para la capa de control de acceso al medio (MAC). A continuación, se describen algunos de los aspectos que trata el estándar. [31]

5.2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

El estándar IEEE 802.15.4 define las características de la capa física y de la capa de control de acceso al medio para las redes inalámbricas de área personal de baja tasa de transmisión (LR-WPAN: *Low-rate Wireless Personal Area Network*). Esta red se caracteriza por ser una red de comunicación simple y de bajo costo que permite la conectividad inalámbrica en aplicaciones con potencia limitada y requisitos de rendimiento relajados. Los principales objetivos de una LR-WPAN son la facilidad de instalación, la transferencia de datos fiable, el coste extremadamente bajo y una duración razonable de la batería, manteniendo un protocolo simple y flexible. También se caracteriza por la variabilidad de la topología de red y el conocimiento de la ubicación.

Algunas de las capacidades que proporciona este estándar son las siguientes:

- Soporta conexiones tanto en estrella como en malla (*peer to peer*)
- Direccionamiento corto con 16 bits y extendido con 64 bits
- Asignación opcional de ranuras de tiempo de garantía (GTS, *guaranteed time slot*)
- Acceso al canal mediante acceso múltiple con detección de portadora con evitación de colisión (CSMA-CA, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) o acceso al canal ALOHA
- Protocolo totalmente reconocido para la fiabilidad de la transferencia

- Bajo consumo de energía
- Detección de los niveles de energía (ED, *Energy Detection*)
- Indicadores de calidad en el enlace (LQI, *Link quality indication*)

COMPONENTES

Un sistema conforme a esta norma consta de varios componentes. El más básico es el dispositivo. Dos o más dispositivos que se comunican en el mismo canal físico constituyen una WPAN. En una red IEEE 802.15.4 pueden participar dos tipos de dispositivos diferentes: un dispositivo de función completa (FFD, *full-function device*) y un dispositivo de función reducida (RFD, *reduced-function device*).

Un FFD es un dispositivo que puede servir como coordinador de la red de área personal (PAN, *Personal Area Network*) o como coordinador. Un RFD es un dispositivo que no puede servir como coordinador de PAN o coordinador. Un RFD está destinado a aplicaciones extremadamente sencillas, como un interruptor de luz o un sensor de infrarrojos pasivo; no tiene la necesidad de enviar grandes cantidades de datos y sólo se asocia a un único FFD a la vez. Por consiguiente, el RFD puede ser implementado usando recursos y capacidad de memoria mínimos. Una WPAN debe incluir al menos un FFD, que funciona como coordinador del PAN.

TOPOLOGÍAS

El estándar permite operar en dos topologías: estrella (*Star*) o punto a punto (*peer-to-peer*), que se pueden observar en la Figura 14.

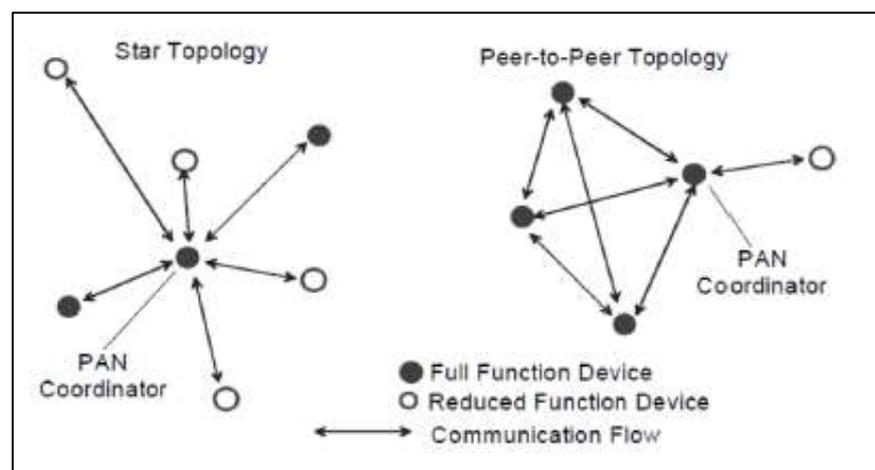


Figura 14. Topologías de red del estándar IEEE 802.15.4 [31]

En la topología estrella la comunicación es establecida entre los dispositivos y un único coordinador de red, el coordinador del PAN. Esta topología normalmente se aplica a la automatización del hogar, juegos, el cuidado de la salud personal...

En la topología *peer-to-peer* también dispone de un coordinador del PAN, pero, a diferencia de la topología de estrella, cualquier dispositivo puede comunicarse con cualquier otro mientras la distancia entre ellos esté en el rango de comunicación directa.

La topología *peer-to-peer* permite formaciones de redes más complejas, como la topología de red en malla. Que tiene aplicación en el control y monitoreo industrial, redes de sensores

inalámbricos, seguimiento de activos e inventarios, agricultura inteligente y seguridad. Una red punto a punto permite múltiples saltos para enrutar los mensajes de cualquier dispositivo a cualquier otro dispositivo de la red. Estas funciones pueden añadirse en la capa superior, pero no forman parte de esta norma.

Un ejemplo de uso de la topología *peer-to-peer* es el *cluster tree*. Es un caso especial de una red *peer to-peer* en la que la mayoría de dispositivos son FFD, los RFD se conectan al final de las ramas del árbol ya que no permite que otros dispositivos se asocien. Cualquiera de los FFD puede ser coordinador y prestar servicios a dispositivos u otros coordinadores, pero sólo uno de ellos será el coordinador general del PAN. El coordinador de PAN forma el primer grupo al elegir un identificador de PAN que no se usa y al transmitir las tramas de la *beacons* a los dispositivos vecinos. Se requiere un mecanismo de resolución de controversias si dos o más FFDs intentan establecerse simultáneamente como coordinadores de PAN; sin embargo, tal mecanismo está fuera del alcance de esta norma. Un dispositivo candidato que recibe una trama de *beacon* puede solicitar unirse a la red en el coordinador de PAN. Si el coordinador de PAN permite que el dispositivo se una, agrega el nuevo dispositivo como un dispositivo hijo en su lista de vecinos. Luego el dispositivo recién incorporado agrega al coordinador de PAN como su padre en su lista de vecinos y comienza a transmitir *beacons* periódicas; otros dispositivos candidatos pueden unirse a la red en ese dispositivo. Si el dispositivo candidato original no puede unirse a la red en el coordinador PAN, buscará otro dispositivo padre.

La forma más simple de una red de *cluster tree* es una red de un solo *cluster*, pero se pueden formar redes más grandes formando una malla de múltiples *clusters* vecinos (Ver Figura 15).

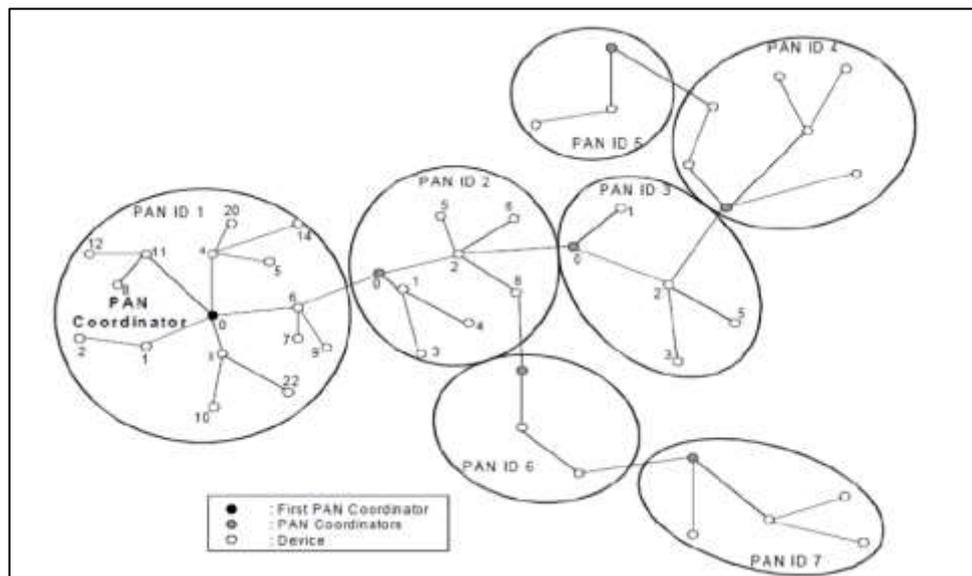


Figura 15. Red cluster tree [31]

ARQUITECTURA

La arquitectura de IEEE 802.15.4 se compone de bloques para simplificar el estándar que se denominan capas. Cada capa es responsable de una parte del estándar y ofrece servicios a las capas superiores.

Un dispositivo LR-WPAN comprende al menos un PHY, que contiene el transceptor de radiofrecuencia (RF) junto con su mecanismo de control de bajo nivel, y una subcapa MAC que

proporciona acceso al canal físico para todo tipo de transferencia. La definición de las capas superiores está fuera del alcance de esta norma.

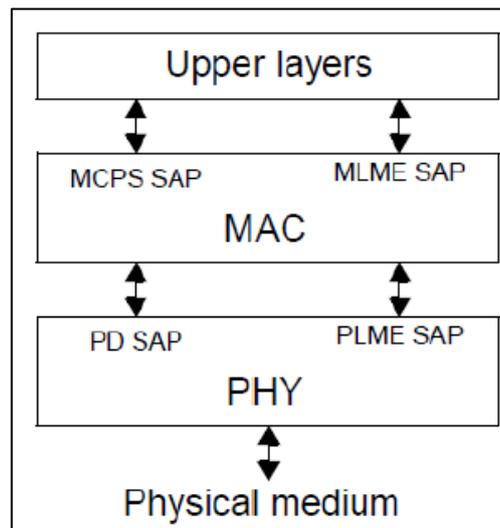


Figura 16. Arquitectura del dispositivo LR-WPAN [31]

El PHY provee dos servicios: el servicio de datos PHY y el servicio de gestión PHY. El servicio de datos PHY permite la transmisión y recepción de unidades de datos de protocolo PHY (PPDU: *PHY Protocol Data Unit*) a través del canal de radio físico.

Las características de la PHY son: la activación y desactivación del transceptor de radio, detección de los niveles de energía (DE), indicadores de calidad en el enlace (LQI), selección de canal, evaluación de canal claro (CCA, *clear channel assessment*), y la transmisión y la recepción de paquetes a través del medio físico.

La subcapa MAC proporciona dos servicios: el servicio de datos MAC y el servicio de gestión MAC, que se interconecta con el punto de acceso de servicio de la entidad de gestión de la subcapa MAC (MLME) (conocido como MLMESAP). El servicio de datos del MAC permite la transmisión y recepción de unidades de datos de protocolo MAC (MPDU) a través del servicio de datos PHY.

Las características de la subcapa MAC son: gestión de *beacons*, el acceso al canal, gestión de ranuras de tiempo de garantía, validación de tramas, entrega de tramas reconocidas, asociación y disociación.

5.2.1. FUNCIONES GENERALES DE UN LR-WPAN

ESTRUCTURA DE LAS SUPERTRAMAS

Este estándar permite el uso opcional de una estructura de supertrama cuyo formato define el coordinador del PAN. La supertrama está delimitada por *beacons* (balizas) de red enviadas por el coordinador y se divide en 16 ranuras de igual duración. Además, puede tener una parte activa y otra inactiva en la que el coordinador puede entrar en un modo de baja potencia (ver Figura 17). La transmisión de la trama de *beacon* comienza al principio de la primera ranura de cada supertrama.

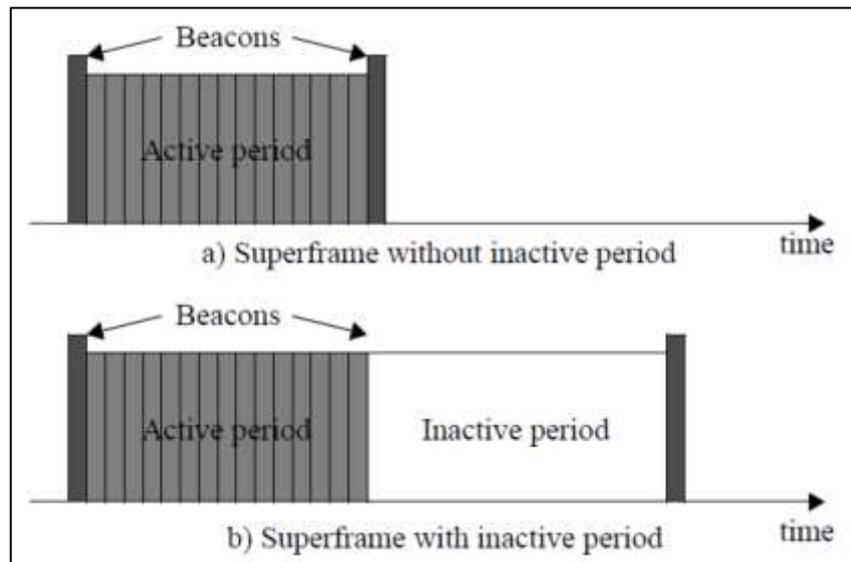


Figura 17. Estructura de la supertrama [31]

Si el coordinador no desea usar una estructura de supertrama, apagará las transmisiones de *beacon*. Las *beacons* se utilizan para sincronizar los dispositivos conectados, para identificar el PAN, y para describir la estructura de las supertramas.

Cualquier dispositivo que desee comunicarse durante el período de acceso de contención (CAP, *contention access period*) entre dos *beacons* compite con otros dispositivos que utilizan un mecanismo de ranura CSMA-CA o ALOHA, según corresponda.

Para aplicaciones de baja latencia o aplicaciones que requieran un ancho de banda específico, el coordinador PAN puede dedicar partes de la supertrama a esa aplicación. Estas partes o porciones son las llamadas ranuras de tiempo de garantía (GTS) que forman el periodo libre de contención (CFP, *contention free period*). Estas ranuras siempre aparecen al final de la supertrama, posterior al CAP. El coordinador del PAN puede asignar hasta siete GTS.

Sin embargo, queda una parte suficiente del CAP para el acceso basado en la contención de otros dispositivos en red o nuevos dispositivos que deseen unirse a la red. Todas las transacciones basadas en la contención se completan antes de que comience el CFP. También cada dispositivo que transmite en un GTS asegura que su transacción se complete antes del momento del próximo GTS o el final de la CFP.

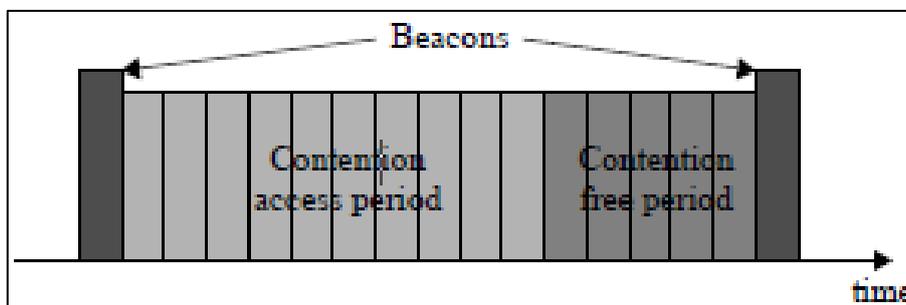


Figura 18. Estructura de los periodos activos con GTSs [31]

MODELO DE TRANSFERENCIA DE DATOS

Se diferencian tres tipos de operaciones de transferencia de datos: transferencia de datos a un coordinador, transferencia de datos desde un coordinador y transferencia de datos de punto a punto (*peer to peer*). Esta última no existiría en el caso de una topología estrella.

Para el caso de transferencia de datos a un coordinador, si es un PAN habilitado para *beacons*, primero escucha la *beacon* de red. Y cuando encuentra la *beacon* de red, el dispositivo se sincroniza con la estructura supertrama. En el momento adecuado, el dispositivo transmite su trama de datos al coordinador y este acusa recibo de la recepción correcta de los datos transmitiendo mediante una trama de reconocimiento, si así se solicita. En cambio, si es un PAN no habilitado para *beacons*, simplemente transmite su trama de datos al coordinador. Este acusa recibo de los datos transmitiendo una trama de confirmación opcional, completando así la transacción.

Si se desea transmitir datos al coordinador, en un PAN habilitado para *beacon*, indica en la *beacon* de red que el mensaje de datos está pendiente. El dispositivo escucha periódicamente la *beacon* de red y, si hay un mensaje pendiente, transmite un comando MAC que solicita los datos. El coordinador acusa recibo de la solicitud de datos transmitiendo una trama de reconocimiento. A continuación, el coordinador envía la trama de datos pendiente. El dispositivo reconoce la recepción satisfactoria de los datos mediante la transmisión de una trama de reconocimiento, si así se solicita. Cuando finalizada con éxito la transacción de datos, el mensaje se elimina de la lista de mensajes pendientes de la *beacon*. Sin embargo, en un PAN no habilitado para *beacons*, almacena los datos para que el dispositivo adecuado se ponga en contacto y solicite los datos. Un dispositivo solicita datos transmitiendo un comando MAC que solicita los datos a su coordinador. El coordinador acusa recibo de la solicitud de datos transmitiendo una trama de acuse de recibo. Si una trama de datos está pendiente, el coordinador transmite la trama de datos. Si una trama de datos no está pendiente, el coordinador indica este hecho en la trama de confirmación que sigue a la petición de datos o en una trama de datos con una carga útil de longitud cero. Si se solicita, el dispositivo reconoce la recepción satisfactoria de la trama de datos mediante la transmisión de una trama de reconocimiento.

Por último, para la transferencia de datos de punto a punto, cada dispositivo se comunica directamente con cualquier otro dispositivo en su rango de radiocomunicaciones. Para hacer esto de manera efectiva, los dispositivos que deseen comunicarse necesitarán recibir constantemente o sincronizarse entre sí. En el primer caso, el dispositivo puede simplemente transmitir sus datos. En el segundo caso, es necesario tomar otras medidas para lograr la sincronización. Estas medidas están fuera del alcance de esta norma.

ESTRUCTURA DE LA TRAMA

Las estructuras de las tramas se han diseñado para reducir al mínimo la complejidad y para ser lo suficientemente robustas para la transmisión en un canal ruidoso. Cada capa de protocolo sucesiva se añade a la estructura con cabeceras y pies de página específicos para cada capa. Se diferencian cuatro tramas:

- Trama de *beacon* o de sincronización
- Trama de datos
- Trama de confirmación (*acknowledgment*)

- Trama de control MAC

Las tramas MAC se pasan al PHY como la unidad de datos de servicio PHY (PSDU). La PPDU se puede ver en la Figura 19.

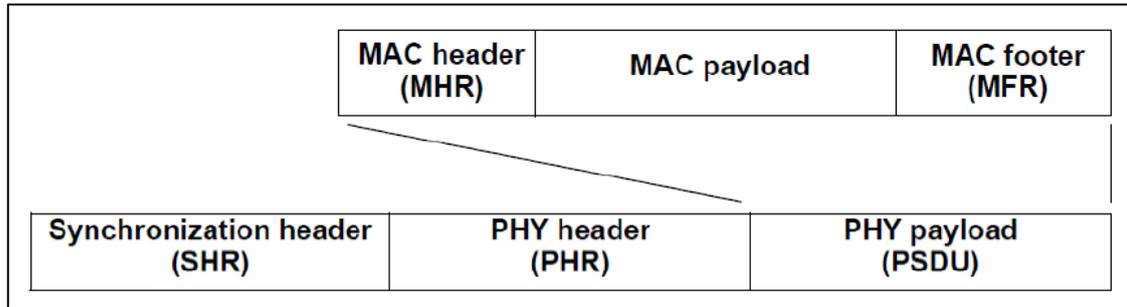


Figura 19. Esquema PPDU [31]

Las estructuras de las tramas MAC se pueden ver en las siguientes figuras (Figura 20, 21, 22 y 23).

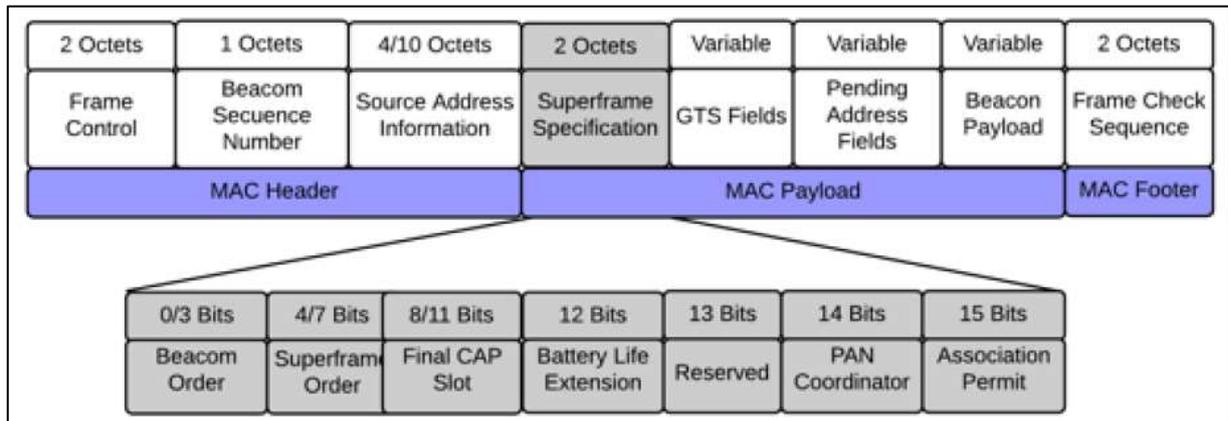


Figura 20. Trama de sincronización

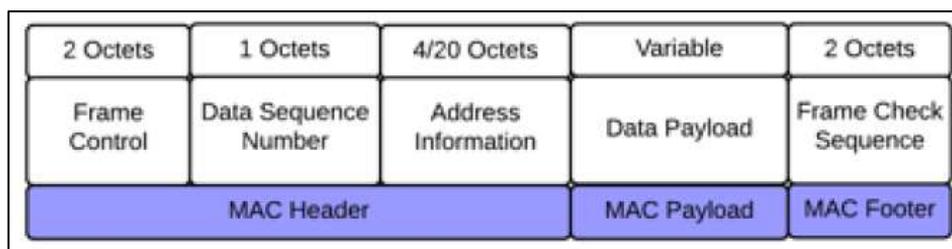


Figura 21. Trama de datos

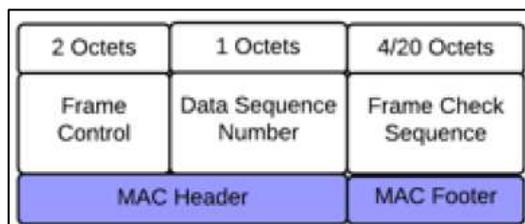


Figura 22. Trama de confirmación

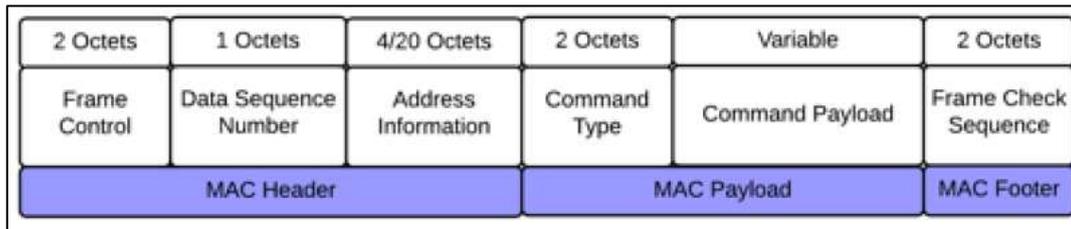


Figura 23. Trama de control MAC

MECANISMOS DE ACCESO AL CANAL

El IEEE 802.15.4 LR-WPAN utiliza dos mecanismos para mejorar la probabilidad de una transmisión de datos exitosa: Mecanismo CSMA-CA y mecanismo ALOHA:

- CSMA-CA

Para el caso de CSMA-CA, las PAN no habilitadas para *beacons* utilizan un mecanismo de acceso de canal CSMA-CA sin ranura. Cada vez que un dispositivo desea transmitir tramas de datos o de comandos MAC, espera un periodo aleatorio. Si se encuentra el canal inactivo, después del retroceso aleatorio, el dispositivo transmite sus datos. Si el canal se encuentra ocupado después del apagado aleatorio, el dispositivo espera otro periodo aleatorio antes de intentar acceder de nuevo al canal. Las tramas de confirmación se envían sin utilizar un mecanismo CSMA-CA. En las PAN habilitadas para *beacon*, utilizan CSMA-CA con ranuras, en el que los periodos de retroceso se alinean con el inicio de la transmisión de la *beacon*. Los periodos de retroceso de todos los dispositivos dentro de un PAN están alineados con el coordinador del PAN. Cada vez que un dispositivo desea transmitir tramas de datos durante el CAP, localiza el límite del siguiente periodo de retroceso y luego espera un número aleatorio de periodos de retroceso. Si el canal está ocupado, después de este retroceso aleatorio, el dispositivo espera otro número aleatorio de periodos de retroceso antes de intentar acceder de nuevo al canal. Si el canal está inactivo, el dispositivo comienza a transmitir en el próximo límite del período de retroceso disponible. Las tramas de confirmación y de *beacon* se envían sin utilizar un Mecanismo CSMA-CA.

- ALOHA

Por otro lado, mediante el mecanismo ALOHA un dispositivo transmite sin detectar el medio o sin esperar un intervalo de tiempo específico. Es apropiado para redes con poca carga, ya que la probabilidad de colisión es razonablemente pequeña si la probabilidad de canal libre es suficientemente grande.

SEGURIDAD

Como en el caso de cualquier otra red inalámbrica, estas redes son vulnerables a los ataques de interceptación pasiva y a la manipulación activa porque no es necesario el acceso físico al cable para participar en las comunicaciones. La naturaleza misma de las redes y sus objetivos de costo imponen limitaciones de seguridad adicionales, que tal vez hagan de esas redes los entornos más difíciles de asegurar.

El mecanismo criptográfico de esta norma se basa en la criptografía de clave simétrica y utiliza claves proporcionadas por procesos de capas superiores. El establecimiento y mantenimiento de estas claves quedan fuera del ámbito de esta norma. El mecanismo supone una aplicación segura de las operaciones criptográficas y un almacenamiento seguro y auténtico del material de las

claves. El mecanismo criptográfico proporciona combinaciones particulares de los siguientes servicios de seguridad:

- Confidencialidad de los datos:

Garantía de que la información transmitida sólo se divulga a las partes a las que está destinada.

- Autenticidad de los datos:

Garantía de la fuente de la información transmitida (y, por la presente, de que esa información no se modificó en tránsito).

- Protección de la reproducción:

Garantía de que la información duplicada es detectada.

La protección actual de las tramas puede adaptarse trama a trama y permite diversos niveles de autenticidad de los datos y la confidencialidad opcional de los datos. Cuando se requiere una protección no trivial, siempre se proporciona una protección de repetición.

La protección de las tramas criptográficas utiliza una clave compartida entre dos dispositivos pares o una clave compartida entre un grupo de dispositivos, lo que permite cierta flexibilidad y compensaciones específicas para cada aplicación entre los costos de almacenamiento y mantenimiento de las claves y la protección criptográfica proporcionada. Si se utiliza una clave de grupo para la comunicación entre pares, sólo se proporciona protección contra dispositivos externos y no contra posibles dispositivos maliciosos del grupo que comparte la clave.

Los servicios se especifican describiendo el flujo de información entre el usuario N y la capa N. Este flujo de información se modela mediante eventos discretos e instantáneos, que caracterizan la prestación de un servicio.

Cada evento consiste en el paso de un servicio primitivo de una capa a la otra a través de una capa SAP (*service access point*) asociada a un N-usuario. Las primitivas de servicio transmiten la información requerida al proporcionar un servicio concreto. Estas primitivas de servicio son una abstracción porque especifican sólo el servicio proporcionado en lugar de los medios por los que se proporciona. Esta definición es independiente de cualquier otra implementación de interfaz. Un servicio se especifica describiendo las primitivas de servicio y los parámetros que lo caracterizan. Se cuatro tipos genéricos de primitivas:

- Solicitud:

La primitiva de petición se utiliza para solicitar que se inicie un servicio.

- Indicación:

La primitiva de indicación se utiliza para indicar al usuario un evento interno.

- Respuesta:

La primitiva de respuesta se utiliza para completar un procedimiento previamente invocado por una primitiva de indicación.

- Confirme:

La primitiva de confirmación se utiliza para transmitir los resultados de una o más solicitudes de servicio previas asociadas.

5.2.2. CAPA MAC

La subcapa MAC maneja todos los accesos al canal de radio físico y es responsable de las siguientes tareas:

- Generar *beacons* de red si el dispositivo es un coordinador
- Sincronización con *beacons* de red
- Apoyo a la asociación y disociación de PAN
- Seguridad de los dispositivos de apoyo
- Empleo del mecanismo CSMA-CA para el acceso al canal
- Manejo y mantenimiento del mecanismo GTS
- Proporcionar un enlace fiable entre dos entidades MAC pares

A lo largo del protocolo, se define la recepción de una trama como la recepción exitosa por parte del PHY y la verificación exitosa por parte de secuencia de verificación de trama (FCS, *frame check sequence*) por la subcapa MAC.

5.2.1. CAPA FÍSICA (PHY)

A menos que se especifique lo contrario en una cláusula PHY, todos los campos reservados se pondrán a cero en la transmisión y tal vez se ignoren en la recepción. La PHY es responsable de las siguientes tareas:

- Activación y desactivación del transceptor de radio
- La detección de energía (ED) dentro del canal actual
- Indicador de calidad del enlace (LQI) para los paquetes recibidos
- Evaluación de canal claro (CCA) para el acceso múltiple del sentido de la portadora con evitación de colisión (CSMA-CA)
- Selección de la frecuencia del canal
- Transmisión y recepción de datos
- Precisión de la banda ultra ancha (UWB, *ultra-wideband*)

Se definen múltiples PHYs para soportar una variedad de bandas de frecuencia, incluyendo:

- 868-868.6 MHz (PHY de 868 MHz)
- 902-928 MHz (PHY de 915 MHz)
- 2400-2483.5 MHz (PHY de 2450 MHz)
- 314-316 MHz, 430-434 MHz, 779-787 MHz (PHY de 780 MHz) → para LR-WPAN sistemas en China
- 950-956 MHz → En Japón

Las PHYs definidas en esta norma son:

- O-QPSK PHY:

DSSS PHY que emplea la modulación O-QPSK, operando en las bandas de 780 MHz, 868 MHz, 915 MHz, y 2450 MHz.

- BPSK PHY:

DSSS PHY que emplea modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK), operando en las bandas de 868 MHz, 915 MHz y 950 MHz.

- ASK PHY:

PHY PSSH que emplea la modulación ASK y la modulación BPSK, y que opera en las bandas de 868 MHz y 915 MHz.

- CSS PHY:

CSS que emplea modulación DQPSK operando en la banda de 2450 MHz.

- UWB PHY:

Modulación combinada de posición de ráfaga (BPM, *burst position modulation*) y modulación BPSK, que opera en las bandas de sub-GHz y 3-10 GHz.

- MPSK PHY:

Modulación MPSK, que funciona en la banda de 780 MHz.

- GFSK PHY:

Modulación GFSK, que funciona en la banda de 950 MHz.

Un dispositivo conforme funcionará en una o varias bandas de frecuencia utilizando los formatos de modulación y dispersión resumidos en la Tabla VII. Los dispositivos se pondrán en marcha en el modo PHY en el que se les indique. Si el dispositivo es capaz de funcionar en las bandas de 868 MHz o 915 MHz usando una de las PHY deberá ser capaz de conmutar dinámicamente entre la PHY opcional y la PHY obligatoria de la BPSK en esa banda cuando se le instruya para ello. Si se admite la banda de 950 MHz, entonces se implementará al menos una de las PHY de la banda de 950 MHz.

Tabla VII. Bandas de frecuencia y tasas de datos [31]

PHY (MHz)	Banda de frecuencia	Parámetros de difusión		Parámetros de los datos		
		Tasa del chip (kchip/s)	Modulación	Tasa de bits (kb/s)	Tasa del símbolo (ksymbol/s)	Símbolo
780	779–787	1000	O-QPSK	250	62,5	16-ary orthogonal
780	779–787	1000	MPSK	250	62,5	16-ary orthogonal
868/915	868–868,6	300	BPSK	20	20	Binary
	902–928	600	BPSK	40	40	Binary
868/915 (opcional)	868–868,6	400	ASK	250	12,5	20-bit PSSS
	902–928	1600	ASK	250	50	5-bit PSSS
868/915 (opcional)	868–868,6	400	O-QPSK	100	25	16-ary orthogonal
	902–928	1000	O-QPSK	250	62,5	16-ary orthogonal
950	950–956	-	GFSK	100	100	Binary
950	950–956	300	BPSK	20	20	Binary
2450 DSSS	2400–2483.5	2000	O-QPSK	250	62,5	16-ary orthogonal
UWB sub-GHz (opcional)	250–750					
2450 CSS (opcional)	2400–2483.5			250	167	
				1000	167	
UWB low band (opcional)	3244–4742					
UWB high band (opcional)	944–10234					

5.3. PROTOCOLO ICMPv6

El Protocolo de mensajes de control de Internet (ICMP) funciona como un administrador de comunicaciones entre los enrutadores y un *host* (dispositivo) o entre *hosts*. Los mensajes ICMP proporcionan información sobre los problemas que se producen en la ruta de enrutamiento hacia el destino. Por ejemplo, que el enrutador no pueda reenviar un paquete, que un paquete generado en un nodo origen sea demasiado grande para pasar por un enrutador intermedio, que el enrutador no tenga suficiente capacidad de memoria intermedia para manejar el paquete... Incluso un nodo de destino puede generar mensajes ICMP debido a cualquiera de las razones anteriormente mencionadas.

Una vez que se genera el mensaje ICMP, se pasa a la capa IP que a su vez encapsula el mensaje ICMP con el paquete IP. Ese paquete se transfiere al nodo de destino utilizando mecanismos generales de enrutamiento IP. A diferencia de en IPv4, que también requiere de ICMP,

ICMPv6 también se utiliza principalmente para informar sobre errores encontrados en el procesamiento de paquetes, y realiza funciones de diagnóstico. [32]

5.4. PROTOCOLO DE ENRUTAMIENTO RPL

Wi-SUN FAN, como se ha nombrado anteriormente, es una de las especificaciones de Wi-SUN y es aplicable para medidores inteligentes e infraestructura avanzada de ciudades inteligentes. En Wi-SUN FAN, se introduce la transmisión multisalto para resolver un problema de área de radio ciega (*blind radio area*) en el entorno urbano. Para construir las redes multisalto se utiliza el protocolo RPL. [33]

El protocolo RPL que fue diseñado para cubrir las necesidades de enrutamiento en redes LLNs. Para crear este protocolo, el organismo de la IETF (*Internet Engineering Task Force*) creó el grupo de trabajo ROLL (*Routing Over Low power and Lossy Networks*) basado en desarrollar un protocolo de enrutamiento *unicast* (envío de información desde un único emisor a un único receptor) en IPv6 que obtuvo el nombre de RPL.

RPL es un protocolo de enrutamiento de vector de distancia, que es capaz de definir las rutas antes de que sean necesarias por los nodos de la red. Se basa en el intercambio de mensajes de control enviados de forma periódica, para poder encontrar y propagar rutas en la red. Dichos mensajes pueden ser a nivel local o de enlace, permitiendo el envío de información a los nodos vecinos o a nivel global para propagar la información relacionada con la topología a todos los nodos de la red. Es un protocolo de red con arquitectura IP que separa las tareas de procesado y reenvío de paquete.

RPL no tiene una capa de enlace definida, por lo que es capaz de soportar diferentes capas de enlace, como, por ejemplo, la proporcionada por el estándar IEEE 802.15.4.

Este protocolo, puede optar por la ruta de enrutamiento óptima basándose en las Funciones Objetivas (OF, *Objective Functions*) del grafo acíclico dirigido (DAG, *directed Acyclic Graph*) que determina la selección de vecinos y nodos parciales. [34]

En Wi-SUN FAN, se adopta el rango mínimo con función objetiva de histéresis (MRHOF, *Minimum Rank with Hysteresis Objective Function*) como una “función objetiva” del RPL para seleccionar un mejor enlace. Y se utiliza el conteo esperado de transmisiones (ETX, *Expected Transmission Count*) como métrica de enrutamiento, mediante la cual se selecciona el nodo “padre” de entre varios posibles nodos. [33]

Este protocolo, construye una red de topología de árbol seleccionando un mejor enlace en cada nodo y tiene funciones para configurar y reparar la topología automáticamente. En esta topología, los nodos de la red se pueden unir a múltiples instancias RPL, pero solo pertenecer a un gráfico acíclico dirigido orientado al destino (DODAG, *Destination Oriented Directed Acyclic Graph*) por cada instancia y cada nodo raíz (*root node*) de la red, construirá una instancia que será un árbol de enrutamiento.

En RPL, la red se organiza en forma de grafo creando una topología DAG compuesta por uno o varios nodos raíces que actúan como nodos sumidero (*sink nodes*). A partir de estos nodos, el grafo se divide en nodos hijos (*leaf nodes*) que se comunicarán con los nodos o nodo raíz a través del mensaje DODAG. [34]

Para construir un DODAG, el RPL utiliza mensajes de control. Se debe tener en cuenta que para el caso de Wi-SUN FAN se diferencian tres tipos de nodos:

- *Border router*:

Actúa como la raíz, el acumulador de datos y la puerta de enlace de la red y conecta la red Wi-SUN FAN a otra red.

- *Router node*:

Es un nodo que puede generar y reenviar tramas pero no puede construir una nueva red.

- *Leaf node*:

Es un nodo que sólo puede generar tramas. También se le denomina *end-device*.

A continuación, se definen los cuatro tipos principales de mensajes de control de RPL:

- Objeto de información del DAG (DIO, *DODAG Information Object*):

Mensaje que comparte la información necesaria para que un nodo se una y mantenga en el DODAG. Sólo los nodos que se unieron a una instancia de RPL pueden transmitir el DIO. El tiempo de transmisión del DIO está determinado por un temporizador de goteo (*trickle timer*).

- Solicitud de información del DODAG (DIS, *DODAG Information Solicitation*):

Se utiliza principalmente para solicitar un DIO de un nodo RPL.

- Objeto de actualización de destino (DAO, *Destination Advertisement Object*):

En Wi-SUN FAN, el DAO es transmitido como un mensaje *unicast* por todos los nodos *router* y *leafs* al *border router*. El DAO se transmite periódicamente para mantener las rutas descendentes.

- Acuse de recibo de DAO (DAO-ACK, *DAO Acknowledgement*):

En Wi-SUN FAN, al recibir un DAO, el *Border router* devuelve el DAO-ACK al remitente del DAO como mensaje de respuesta. Cuando un nodo que ha transmitido un DAO no recibe un DAO-ACK después de un período de tiempo, el DAO se retransmite. [35]

Para construir un DODAG, el *Border Router* envía un mensaje DIO a sus vecinos próximos. Esos vecinos decide si se une o no al DODAG de acuerdo con la función objetiva y otros criterios. Si es así, el *Border Router* es anotado como su “padre”. Cada nodo en el DODAG establece temporizadores de goteo para la transmisión del mensaje DIO. Al recibir un DIO, si el nodo es el *Border Router* o el nodo fuente tiene un rango superior, el mensaje se ignora. Si no, en caso de que el nodo decida unirse al DODAG, el nodo fuente del DIO puede ser incluido en el conjunto de padres del DODAG. El nodo que tiene el mejor valor de “función objetiva” se marca como el padre preferido, que proporciona la ruta ascendente por defecto del nodo hijo. Así, los paquetes ascendentes pueden ser enrutados salto a salto hasta la raíz. Un vecino puede enviar un mensaje DIS para solicitar la transmisión de un mensaje DIO.

De acuerdo con el modo de no almacenamiento de RPL, los paquetes descendentes se enrutan usando la ruta de origen desde la raíz. Cada nodo, excepto el *Border Router*, envía mensajes

DAO al *Border Router* indicando su ruta a sus padres del DODAG. Cuando el *Border Router* recibe mensajes DAO de todos los nodos, escanea las rutas fuente de la construcción a cualquier nodo en el DODAG.

Para la comunicación entre dos pares, en el modo sin almacenamiento, el paquete sube al *Border Router* al principio y luego se envía al nodo de destino a través de la ruta de origen.

Cuando se produce un fallo en el enlace, si un nodo no tiene un padre alternativo se convierte en la raíz de un DODAG flotante y envía DIO a sus vecinos para anunciar este cambio. Cada nodo hijo se cambia a un padre alternativo si es posible, pero por lo demás permanece en el DODAG flotante. Al recibir los mensajes DIO de los nodos en el DODAG anclado, un nodo en el DODAG flotante intenta encontrar un nuevo padre DODAG preferido. Una vez que se recupera la conexión en este nodo, los demás nodos del DODAG flotante pueden unirse al DODAG anclado a través de este nuevo enlace. La topología del DODAG flotante podría cambiar durante este proceso de redireccionamiento local. [36]

5.5. PROTOCOLO 6LOWPAN

El estándar 6LowPAN fue desarrollado por la IETF para encontrar una solución al transporte de paquetes IPv6 sobre tramas IEEE 802.15.4.

Este protocolo, implementa direccionamiento IPv6 (en lugar de IPv4) ya que este ofrece mayores ventajas, como, espacio direccionamiento, escalabilidad y autoconfiguración sin estado, y logra la interconexión de las redes con otras redes externas. Sin embargo, como desventaja, su uso en este tipo de redes supone un incremento del tamaño de las direcciones IPv6 y de la unidad máxima de transferencia (MTU, *Maximum Transmission Unit*) en 1280 bytes. Proporciona mecanismos de encapsulación y compresión de cabeceras para la transmisión de paquetes permitiendo adaptarse a las restricciones del protocolo 802.15.4 (máximo 127 bytes) llegando a alcanzar un tamaño de 4 bytes.

Entre las ventajas de este protocolo se encuentran:

- El uso de direcciones IP permite tener una infraestructura de red ya existente.
- Es un estándar abierto.
- Existen herramientas para el diagnóstico y la gestión de redes IP.
- Los dispositivos con IP pueden conectarse directamente a redes IP, sin la necesidad de entidades intermedias.
- Es capaz de soportar anchos de banda con tasas de transferencia de hasta 259 kbps, 40 kbps y 20 kbps.
- Soporta direcciones MAC de 16 bits cortas o 64 bits extendidos.
- Soporta un gran número de dispositivos conectados a la red
- La localización de estos dispositivos no está predefinida en algunos casos ya que podrían cambiar de posición dinámicamente
- Los dispositivos en una red 6LowPAN suelen estar largos periodos de tiempo en modo de hibernación (*Sleep Mode*) para ahorrar energía

Diferencias con IPv6:

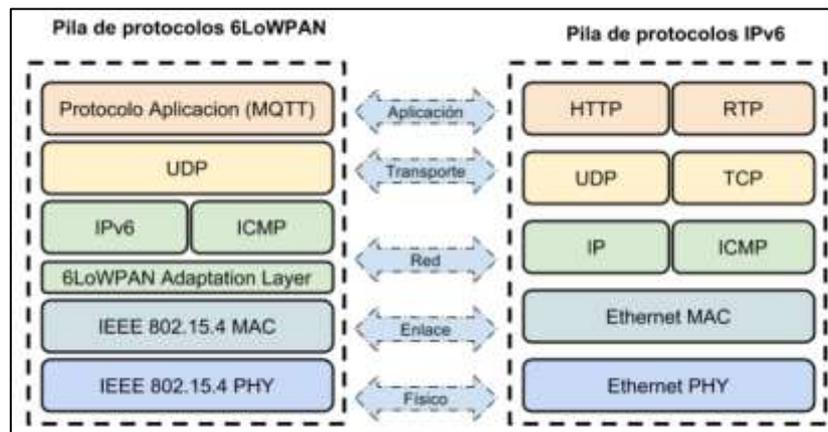


Figura 24. Comparación pila de protocolos 6LoWPAN vs IPv6 [32]

6LoWPAN utiliza ICMPv6 para los mensajes de control, descubrimiento de vecinos y detección de destinos inalcanzables. [34]

5.6. PROTOCOLO UDP

El protocolo UDP, se define como un protocolo simple que se basa en el intercambio de datagramas. Permite el envío de paquetes a través de la red sin establecer una conexión, sin emplear ninguna sincronización entre el origen y el destino. Al no haber conexión, estos paquetes permiten utilizar como dirección IP de destino la dirección de *broadcast* (envío a todos los destinos posibles de la red del *host* emisor) o de *multicast* (envío a un grupo de destinos) de IP, pudiendo enviar un mismo paquete a varios destinos de forma simultánea.

UDP trabaja con paquetes o datagramas enteros, es decir, intercambia información en forma de bloques de bytes y por cada bloque que se envía de la capa de aplicación a la de transporte se ha enviado un paquete UDP.

Además, no tiene confirmación ni control de flujo ni ordena los paquetes, por lo que no es nada fiable (los paquetes pueden adelantarse unos a otros y no hay confirmación de entrega o recepción). Sin embargo, el UDP puede añadir opcionalmente una suma de verificación (que es obligatoria en IPv6) que permite detectar los paquetes defectuosos.

Su mayor ventaja es que la carga adicional que provoca en la red es poca, puesto que es un protocolo simple. [37]

5.7. PROTOCOLO TCP

El protocolo TCP es un protocolo orientado a la conexión. Necesita establecer una conexión previa al envío y recepción de datos entre cliente y servidor, y una desconexión final.

A diferencia de UDP, este protocolo sí trabaja con un flujo de bytes. La capa de aplicación envía y recibe desde la capa de transporte bytes individuales y el proceso TCP del emisor agrupa los bytes en paquetes de tamaño adecuado para mejorar el rendimiento y evitar la fragmentación a nivel IP.

Este protocolo sí utiliza control de flujo utilizando la ventana deslizante de envío continuo y tramas de confirmación (ACKs o *Acknowledgements*) y, además, ordena los paquetes. Para el control de flujo, un receptor envía un ACK del siguiente byte que desea recibir para confirmar una recepción correcta hasta ese byte. Si el receptor recibe errores en un paquete no se envía ACK. En el emisor, se usa un tiempo máximo de espera, transcurrido el cual sin recibir ACK se reenvía de nuevo el paquete. [37]

5.8. ANTENAS

Son dispositivos que permiten transformar la energía electromagnética que circula a través de un conductor u otro dispositivo que transporta una señal de radiofrecuencia, a una onda electromagnética que viaja por el espacio.

Las ondas electromagnéticas se caracterizan por su frecuencia (f) y longitud de onda (λ) que se define mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Donde,

c : velocidad de la luz ($3 \cdot 10^8$ m/s en el espacio libre) [m/s]

λ : Longitud de onda [m]

f : Frecuencia [Hz]

El conjunto de todas las frecuencias se denomina espectro y se divide en diferentes bandas. Cada una de las bandas dispone de características peculiares que dan origen a tipologías de antenas muy diversas.

En general, las antenas se utilizan para altas frecuencias y largas distancias. En el resto de casos, se utilizan líneas de transmisión.

Teniendo en cuenta su geometría las antenas se pueden clasificar en antenas de cable (p.ej. dipolos, monopolos, espiras, helicoides), antenas de apertura (p.ej. bocinas, ranuras, antenas *microstrip*), reflectores (p.ej. las grandes antenas de observación del espacio), lentes y agrupaciones de antenas.

Teniendo en cuenta su comportamiento, se clasifican en antenas de banda ancha antenas miniatura y antenas multifrecuencia. Las antenas de banda ancha, son capaces de trabajar en un margen muy amplio de frecuencias. Las antenas miniatura, tienen dimensiones mucho más pequeñas que la longitud de onda. Y, por último, las antenas multifrecuencia pueden operar con características muy similares para diferentes sistemas de telecomunicación.

Es importante tener en cuenta ciertos términos claves en las antenas, algunos de ellos se definen a continuación:

- Ancho de banda

Se refiere al margen de frecuencias (en Hz) en el que puede operar una antena, cumpliendo la reciprocidad y en el cuál se encuentra en resonancia el sistema.

- Impedancia de entrada

Se refiere a la relación entre la tensión y la corriente presente en el puerto de entrada, es decir, la carga en ohmios que representa la antena para el sistema.

En términos generales, la impedancia de una antena es una cantidad compleja, donde la parte imaginaria representa las características reactivas (inductancias y capacitancias) y la parte real las características resistivas (medida en ohmios). Estos valores están en función de la frecuencia a la que se someta el dispositivo, y es en la frecuencia de trabajo donde la parte imaginaria es igual a cero, y el comportamiento es puramente resistivo. Este valor es el que los fabricantes entregan como impedancia. Un valor típico sería 50Ω .

- Ganancia

La ganancia pone de manifiesto el hecho de que una antena real no radia toda la potencia que se le suministra, si no que parte de ésta se disipa en forma de calor.

Es una cantidad adimensional que está comparada normalmente respecto a una antena isotrópica (una antena ideal que radia la misma intensidad de radiación en todas las direcciones del espacio). Debido a que la energía se debe conservar, cuando una antena radia mayor potencia en una dirección, se está perdiendo potencia en otra, por esta razón se puede hacer una comparación con una antena isotrópica que tenga la misma potencia total y medir la ganancia en una dirección específica. Es común que se exprese la ganancia en la dirección de máxima propagación. Se utiliza entonces los decibelios para expresar en escala logarítmica la ganancia y se le agrega una “i” al final cuando la antena de comparación es una isotrópica (dBi).

- Directividad

Es la capacidad de transmisión o recepción de una antena en una dirección específica, normalmente la de máxima radiación. Se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia y la densidad de potencia que radiaría a esta misma distancia una antena isotrópica que radiase la misma potencia que la antena transmisora.

Mediante la ecuación de transmisión se puede hacer un balance de potencias de un sistema de comunicación. La ecuación de transmisión de Friss determina la potencia recibida por la antena receptora. Esta fórmula se refiere a pérdidas de trayectoria en espacio libre de ganancias de antena y longitud de onda a la potencia recibida y transmitida. La ecuación de transmisión de Friss se define como:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (2)$$

Donde,

P_r : Potencia recibida por la antena

P_t : Potencia de salida de la antena transmisora

G_r : Ganancia de la antena receptora con respecto a la antena isotrópica

G_t : Ganancia de la antena transmisora con respecto a la antena isotrópica

λ : Longitud de onda (si usas una frecuencia a esa frecuencia se le asocia una longitud de onda)

r : distancia entre las antenas [m]

El término $\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2$ se denomina “perdidas de transmisión” en el espacio libre y corresponde a la pérdida de transmisión entre antenas isotrópicas. [38]

La fórmula (2) sería la fórmula lineal, para usar valores logarítmicos, como decibelios (dB) y decibelio milivatio (dBm), se aplica la siguiente fórmula:

$$P_t + G_t + G_r + 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right) \quad (3)$$

6. VERIFICACIONES EXPERIMENTALES MEDIANTE SIMULACIONES O ENSAYOS

Para conocer el funcionamiento de la tecnología Wi-SUN y verificar si su implantación es factible, se han realizado ensayos con placas de evaluación de dos diferentes fabricantes: Rohm y Renesas. Analizando primero la comunicación entre las placas de cada fabricante, valorando cual ofrece más alternativas para la comunicación y desarrollando después un análisis más profundo del fabricante considerado como mejor opción.

6.1. COMUNICACIÓN ENTRE LAS PLACAS DE EVALUACIÓN DE ROHM

Se dispone de dos placas de evaluación ML7406 (ver Figura 25) con las que mediante el ejecutable ML7406_GUI_V15.exe se realizan diferentes ensayos para la comprobación de comunicación entre ellas. Para ello, se conectarán mediante un USB a diferentes ordenadores.

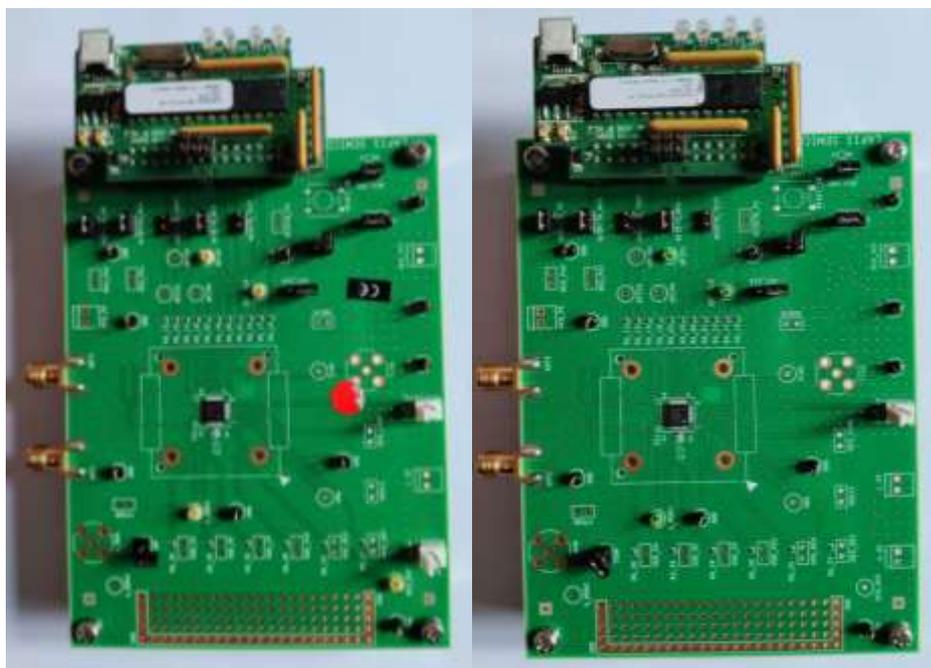


Figura 25. Placas Rohm (izquierda: nodo 0; derecha: nodo 1)

La familia ML7406 soporta comunicaciones inalámbricas de corto alcance en el rango de 750 MHz-960 MHz, lo cual es aplicable a la medición inteligente europea (868 MHz Wireless M-bus). El manejador de paquetes wireless M-bus incorporado hace posible procesar la sincronización de datos y el control de la cabecera de los paquetes que se hacen convencionalmente por software, por medio del manejador de paquetes wireless M-bus, logrando reducir alrededor del 20% de la utilización de la MCU, en comparación con los sistemas convencionales (procesamiento de software) y contribuir a reducir el consumo de corriente del sistema.

Wireless M-Bus [39] es un estándar europeo (EN 13757-4) que especifica la comunicación entre los medidores de servicios públicos y los registradores de datos, los concentradores o las puertas de enlace de medidores inteligentes. Este estándar se está utilizando como base para AMI.

El estándar usa 3 frecuencias diferentes: 868 MHz, 433 MHz y 169 MHz. (en el caso de ML7406 868 MHz). Además, se diferencian varios modos especificados en varias frecuencias

como se muestra en la Tabla VIII. Por un lado, los modos S, T, C y N se usan más comúnmente, siendo el modo N más popular en la banda de 169MHz. Los modos R y F son menos comunes y los modos P y Q no se usan hoy en día. Estos modos tienen submodos unidireccionales y bidireccionales.

Tabla VIII. Modos S, T y C [33]

Modo	Frecuencia (MHz)	Notas
S (estacionario)	868	Los medidores envían datos pocas veces al día
T (transmisión frecuente)	868	Los medidores envían datos varias veces al día
C (compacto)	868	Versión de mayor velocidad de datos del modo T
N (banda estrecha)	169	Sistema de banda estrecha de largo alcance
R (recepción frecuente)	868	El colector lee múltiples medidores en diferentes canales de frecuencia
F (transmisión y recepción frecuente)	433	Comunicación bidireccional frecuente

Para el caso de ML7406, teniendo en cuenta que su frecuencia es de 868 MHz, y que como se ha nombrado el modo R no se utiliza, dispone de los modos S, T y C que requieren diferentes precisiones como se puede observar en la Tabla IX.

Tabla IX. Modos S, T y C

Especificación	Precisión requerida
Wireless M-Bus S mode	± 60 ppm (<i>Meter</i>) ± 25 ppm (<i>Other</i>)
Wireless M-Bus T mode	± 60 ppm (<i>Meter</i>) ± 25 ppm (<i>Other</i>)
Wireless M-Bus C mode	± 25 ppm

Por otro lado, en cuanto a la estructura de la pila de protocolos de wireless M-Bus es ligeramente diferente a la del modelo OSI y tiene menos requisitos. Siendo sus tres capas principales son la capa de aplicación, la capa de enlace de datos y la capa física, como se puede observar en la Tabla X. La relativa simplicidad de la pila de protocolos hace que sea muy eficiente en cuanto a energía.

Tabla X. Modos S, T y C

Modelo OSI	Pila básica de WM-Bus
Capa de aplicación	Capa de aplicación
Capa de presentación	Capa de enlace de datos
Capa de sesión	Capa física
Capa de transporte	
Capa de red	
Capa de enlace de datos	
Capa física	

En la Tabla XI se pueden observar diferentes características de ML7406.

Tabla XI. Características de ML7406

Frecuencia de operación	750 MHz – 960 MHz
Modulación	FSK/GFSK
Velocidad de datos	1,2 kbps – 500 kbps
Ancho de banda	100 kHz - 1,6 MHz
Estándar	IEEE802.15.4g

En cuanto a las características de transmisión (TX) y recepción (RX), en la Tabla XII y Tabla XIII se pueden observar los diferentes niveles de potencia de los que dispone ML7406.

Tabla XII. Características TX

Parámetro	Condiciones	Mín.	Típ.	Máx.
Potencia TX	Modo 20 mW (13 dBm)	9 dBm	13 dBm	15 dBm
	Modo 10 mW (10 dBm)	6 dBm	10 dBm	12 dBm
	Modo 1 mW (0 dBm)	-4 dBm	0 dBm	4 dBm
Rango de sintonía de desviación de frecuencia		0,025 kHz	-	400 kHz
Nivel de emisión espurio (modo 10 mW)	Armónicos de 2º orden	-	-35 dBm	-30 dBm
	Armónicos de 3er orden	-	-35 dBm	-30 dBm

Tabla XIII. Características RX

Parámetro	Condiciones	Mín.	Típ.	Máx.
Sensibilidad mínima RX BER < 0,1% (*)	Modo 32,767 kbps	-	-108 dBm	-
	Modo 100 kbps	-	-105 dBm	-100 dBm
Nivel máximo de entrada de RX	BER < 0,1%	0	-	-
Nivel mínimo de detección de energía (ED)	Armónicos de 2º orden	-	-107 dBm	-100 dBm
Rango de ED	Rango dinámico	60 dB	70 dB	-
Precisión de ED		-6 dB	-	+6 dB
Nivel de emisiones secundario	Frecuencia local	-	-63 dBm	-57 dBm
	Frecuencia superior a 1000 MHz	-	-57 dBm	-47 dBm

(*)BER: Tasa de error binario.

Para realizar los ensayos, primero se conectan las placas en diferentes ordenadores a una pequeña distancia (4 metros aproximadamente) y se ejecuta el software en ambos. El software detecta el dispositivo y es entonces cuando a uno de los dos se le asigna el modo de colector de datos (*Other*) y al otro dispositivo se le debe asignar el modo de medición (*meter*). En el caso de disponer de más dispositivos, todos ellos deben tener el modo *meter* exceptuando uno de ellos que tendrá el modo *other*.

En cuanto al formato del paquete, se dispone de dos formatos: Formato A y Formato B

El Formato A consta de un primer bloque, un segundo bloque y bloques opcionales. Cada bloque tiene al final 2 bytes de CRC (*Cyclic Redundancy Check*) que es un código de detección de errores que detecta cambios accidentales en los datos. El "campo L" (1er byte del 1er bloque)

indica la longitud del paquete, que incluye los posteriores bytes de datos de usuario del "campo C". Sin embargo, se excluyen los bytes CRC y postámbulo. En función del valor del "campo L", se añaden el segundo bloque y el bloque o bloques opcionales.

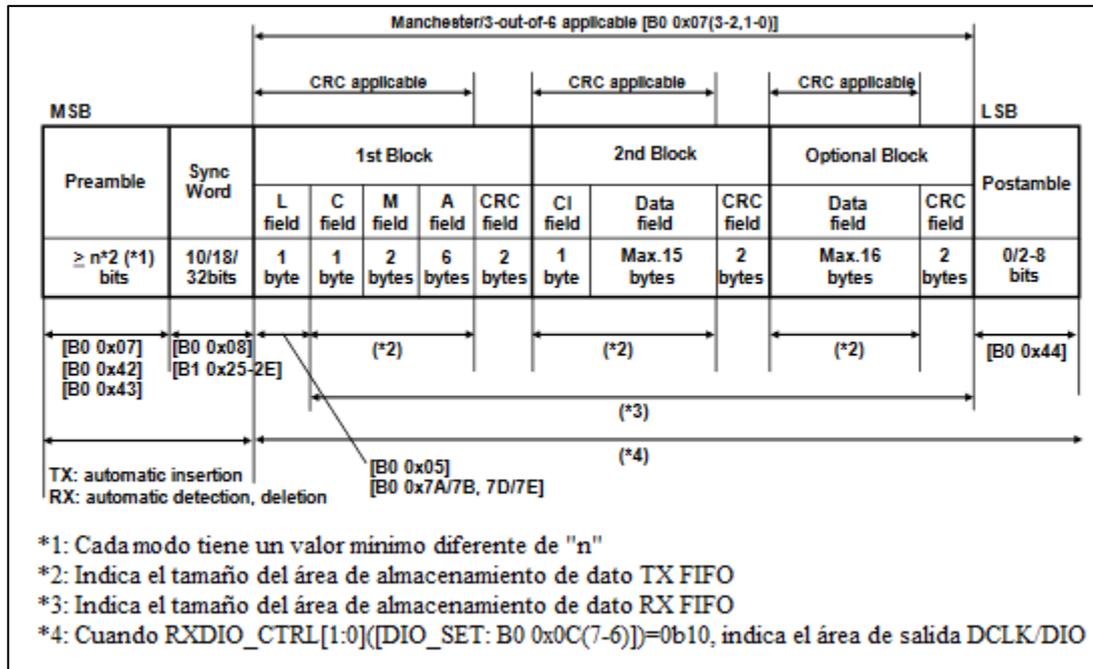


Figura 26. Formato de paquete A sin extensión

Si "CI-field"(1st byte of 2nd Block)=0x8C (formato de 2 bytes de extensión) o =0x8D (formato de 8 bytes de extensión), se aplica el formato de capa de enlace extendida de 2 y 8 bytes, que se pueden observar en la Figura 27 y la Figura 28

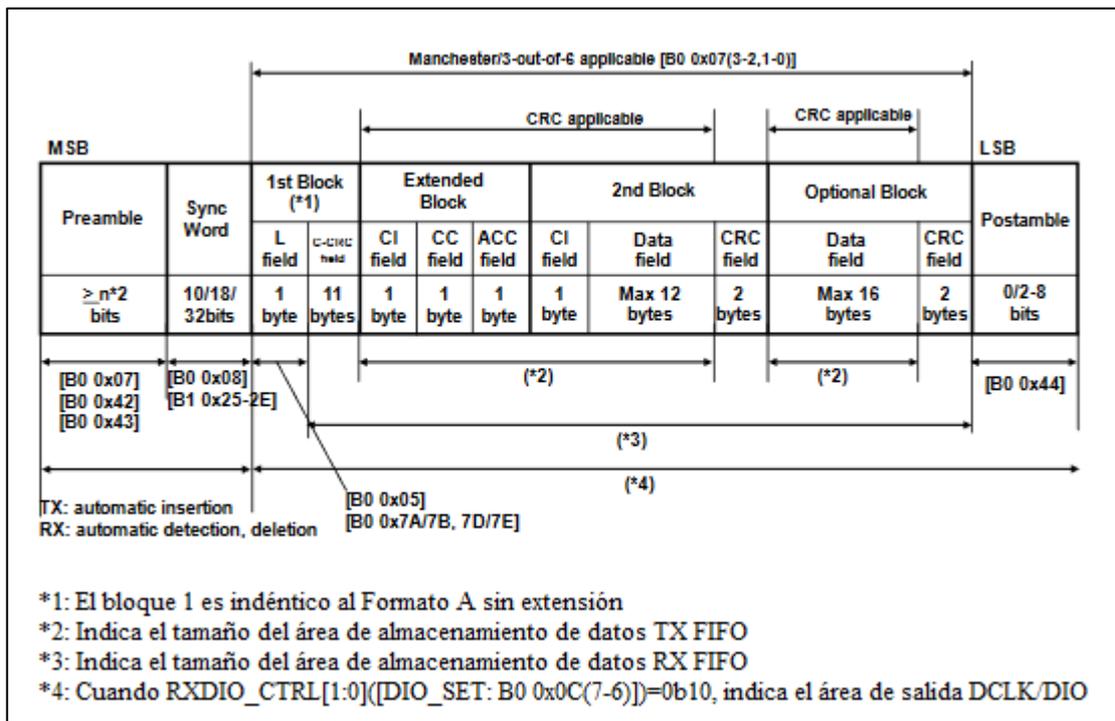


Figura 27. Formato de paquete A con 2 bytes de extensión

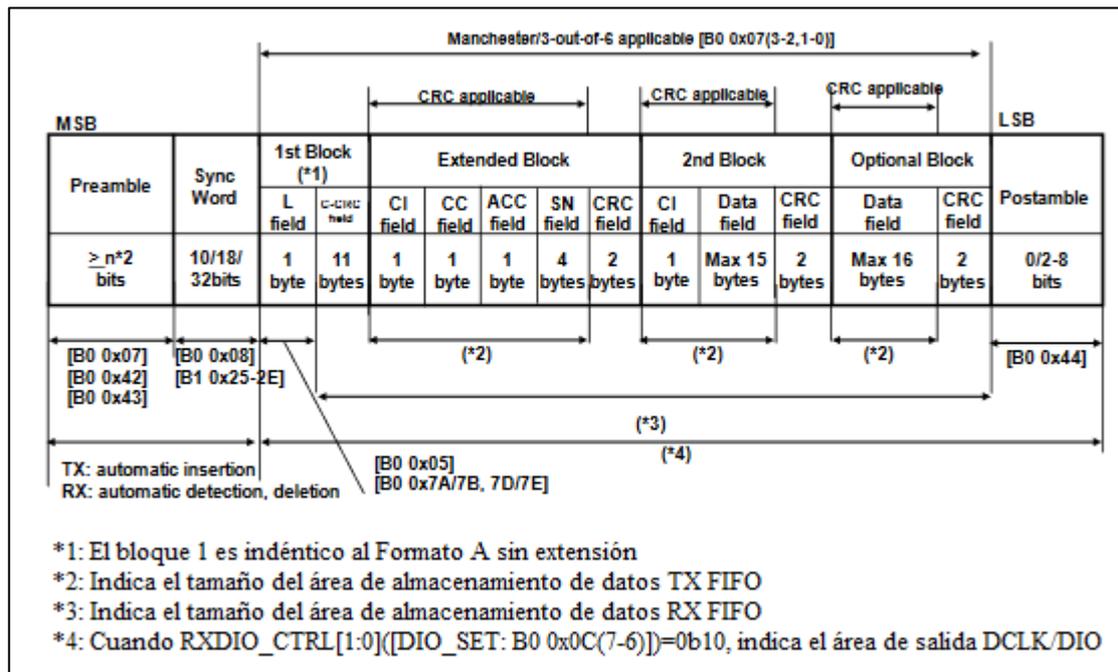


Figura 28. Formato de paquete A con 8 bytes de extensión

Por otro lado, el Formato B consiste en un primer bloque, un segundo bloque y un bloque opcional. Cada bloque a partir del segundo bloque dispone de 2 bytes de CRC. Al igual que en el Formato A, el "campo L" indica la longitud del paquete, que incluye los posteriores bytes de datos de usuario del "campo C". Sin embargo, a diferencia del Formato A, los bytes CRC están incluidos (los postámbulos sí están excluidos). Dependiendo del valor del "campo L", se añaden el segundo bloque y el bloque o bloques opcionales.

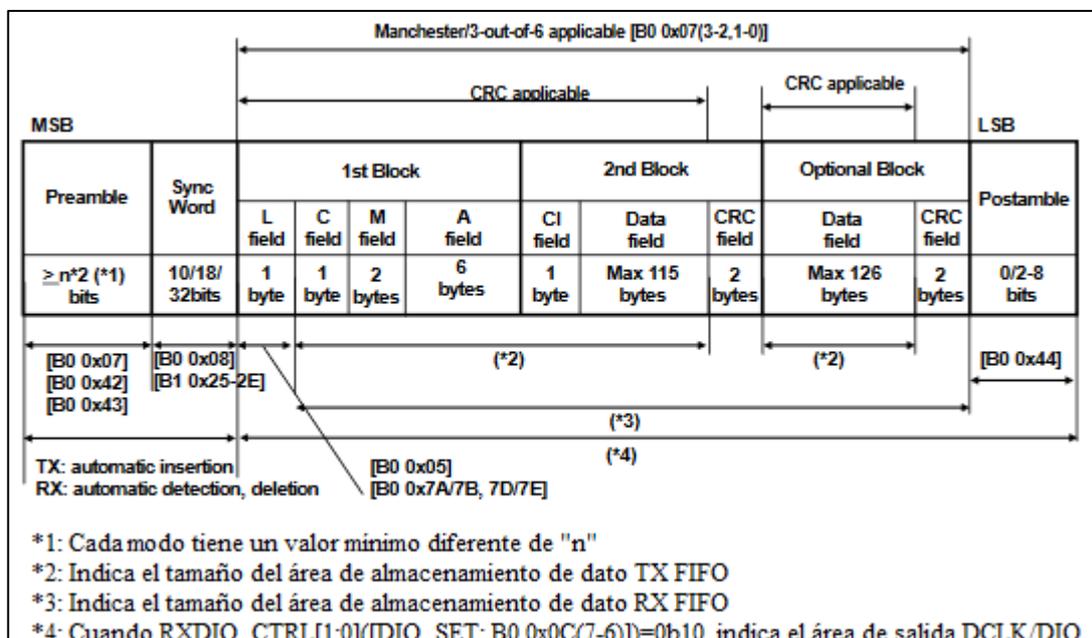


Figura 29. Formato de paquete B sin extensión

De igual manera que en el Formato A, si "CI-field" (1st byte of 2nd Block)=0x8C (formato de 2 bytes de extensión) o =0x8D (formato de 8 bytes de extensión), se aplica el formato de capa de enlace extendida de 2 y 8 bytes, que se pueden observar en la Figura 30 y la Figura 31

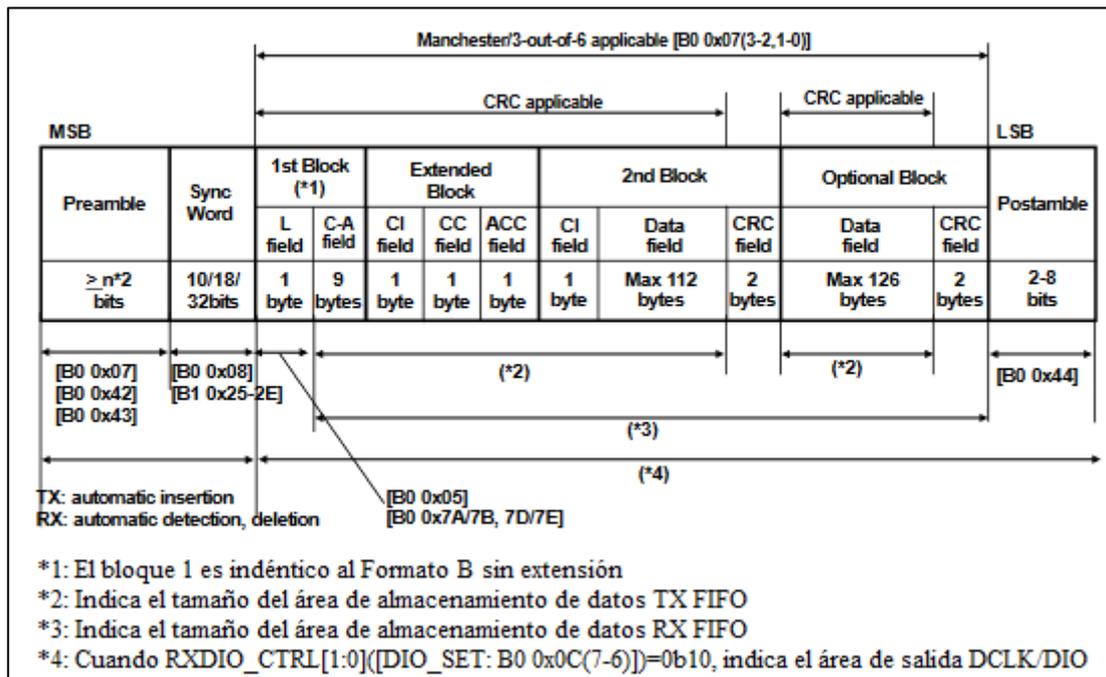


Figura 30. Formato de paquete B con 2 bytes de extensión

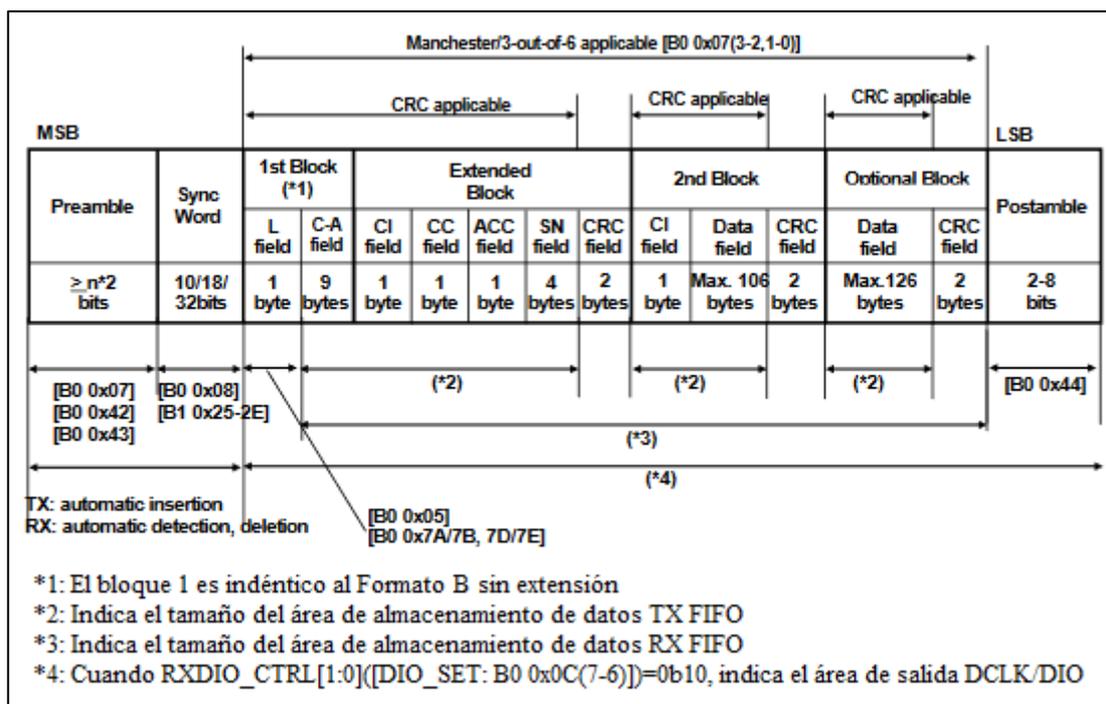


Figura 31. Formato de paquete B con 8 bytes de extensión

Una vez configurados los dispositivos, se realizan diferentes ensayos transmitiendo mensajes del nodo 0 al nodo 1 y al revés, variando los modos (S, T o C) y el formato de paquete (A o B), para observar si es posible la comunicación entre estos en cualquiera de esas configuraciones. Se mantiene una distancia de 4 metros entre los dispositivos y con una potencia de transmisión de 20 mW (13 dBm). En la Tabla XIV se observa el resumen de los ensayos que se desarrollan a continuación.

Tabla XIV. Ensayos con los dispositivos de Rhom

Ensayo	Mensaje	Nodo emisor	Nodo receptor	Modo	Formato de paquete
1	HOLA	Nodo 0 (<i>Other</i>)	Nodo 1 (<i>Meter</i>)	T	A
2	HOLA	Nodo 1 (<i>Meter</i>)	Nodo 0 (<i>Other</i>)	T	A
3	radiofrecuencia	Nodo 0 (<i>Other</i>)	Nodo 1 (<i>Meter</i>)	T	A
4	HOLA	Nodo 0 (<i>Other</i>)	Nodo 1 (<i>Meter</i>)	S	A
5	HOLA	Nodo 1 (<i>Meter</i>)	Nodo 0 (<i>Other</i>)	C	A
6	HOLA	Nodo 0 (<i>Other</i>)	Nodo 1 (<i>Meter</i>)	S (nodo 0) T (nodo 1)	A
7	HOLA	Nodo 0 (<i>Other</i>)	Nodo 1 (<i>Meter</i>)	C (nodo 0) S (nodo 1)	A
8	HOLA	Nodo 0 (<i>Other</i>)	Nodo 1 (<i>Meter</i>)	T (nodo 0) C (nodo 1)	A
9	HOLA	Nodo 0 (<i>Other</i>)	Nodo 1 (<i>Meter</i>)	T	B

1.) PRIMER ENSAYO

Tabla XV. Primer ensayo

Mensaje	HOLA
Emisor	Nodo 0 (<i>Other</i>)
Receptor	Nodo 1 (<i>Meter</i>)
Modo	T
Formato de paquete	A



Figura 32. Configuración del nodo 0 para el primer ensayo



Figura 33. Configuración del nodo 1 para el primer ensayo

Se observa que el número de paquetes enviados (114) desde el nodo colector (nodo 0) son recibidos por el nodo de medición (nodo 1) a una potencia de recepción $-36,9$ dBm que en vatios se calcula con la siguiente fórmula:

$$P(W) = 1 \text{ W} \cdot \frac{10^{\frac{P(\text{dBm})}{10}}}{1000} = 10^{\frac{P(\text{dBm})-30}{10}} \quad (4)$$

Aplicando la formula (4)

$$P(W) = 10^{\frac{-36,9-30}{10}} = 2,042 \cdot 10^{-7} \text{ W} = 204,174 \text{ nW}$$

2.) SEGUNDO ENSAYO

Tabla XVI. Segundo ensayo

Mensaje	HOLA
Emisor	Nodo 1 (<i>Meter</i>)
Receptor	Nodo 0 (<i>Other</i>)
Modo	T
Formato de paquete	A



Figura 34. Configuración del nodo 0 para el segundo ensayo



Figura 35. Configuración del nodo 1 para el segundo ensayo

Se observa que el número de paquetes enviados (85) desde el nodo de medición (nodo 1) son recibidos por el nodo colector (nodo 0) a una potencia de recepción de $-36,9$ dBm ($204,174$ nW).

3.) TERCER ENSAYO

Tabla XVII. Tercer ensayo

Mensaje	radiofrecuencia
Emisor	Nodo 0 (<i>Other</i>)
Receptor	Nodo 1 (<i>Meter</i>)
Modo	T
Formato de paquete	A



Figura 36. Configuración del nodo 0 para el tercer ensayo



Figura 37. Configuración del nodo 1 para el tercer ensayo

Se observa que el número de paquetes enviados (85) desde el nodo de medición (nodo 1) son recibidos por el nodo colector (nodo 0) a una potencia de recepción de -36,9 dBm (204,174 nW).

4.) CUARTO ENSAYO

Tabla XVIII. Cuarto ensayo

Mensaje	HOLA
Emisor	Nodo 0 (<i>Other</i>)
Receptor	Nodo 1 (<i>Meter</i>)
Modo	S
Formato de paquete	A



Figura 38. Configuración del nodo 0 para el cuarto ensayo

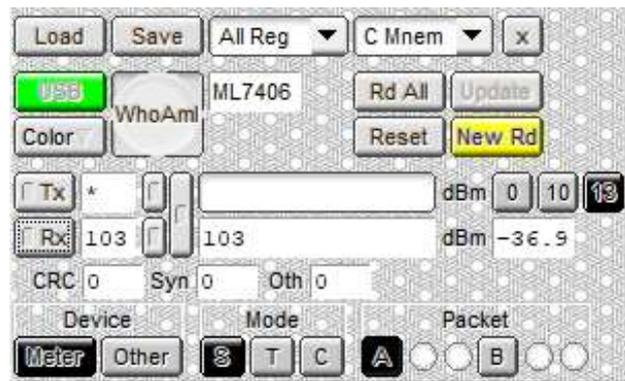


Figura 39. Configuración del nodo 1 para el cuarto ensayo

Se observa que el número de paquetes enviados (103) desde el nodo colector (nodo 0) son recibidos por el nodo de medición (nodo 0) a una potencia de -36,9 dBm (204,174 nW).

5.) QUINTO ENSAYO

Tabla XIX. Quinto ensayo

Mensaje	HOLA
Emisor	Nodo 1 (Meter)
Receptor	Nodo 0 (Other)
Modo	C
Formato de paquete	A



Figura 40. Configuración del nodo 0 para el quinto ensayo



Figura 41. Configuración del nodo 1 para el quinto ensayo

Se observa que el número de paquetes enviados (122) desde el nodo de medición (nodo 1) son recibidos por el nodo colector (nodo 0) a una potencia de recepción de -36,9 dBm (204,174 nW).

6.) SEXTO ENSAYO

Tabla XX. Sexto ensayo

Mensaje	HOLA
Emisor	Nodo 0 (<i>Other</i>)
Receptor	Nodo 1 (<i>Meter</i>)
Modo Nodo 0	S
Modo Nodo 1	T
Formato de paquete	A



Figura 42. Configuración del nodo 0 para el sexto ensayo



Figura 43. Configuración del nodo 1 para el sexto ensayo

Se observa que el número de paquetes enviados (199) desde el nodo colector (nodo 0) son recibidos por el nodo de medición (nodo 1) a una potencia de recepción de $-37,5$ dBm que aplicando la fórmula (4) equivale a:

$$(W) = 10^{\frac{-37,5-30}{10}} = 1,778 \cdot 10^{-7} \text{ W} = 177,828 \text{ nW}$$

7.) SÉPTIMO ENSAYO

Tabla XXI. Séptimo ensayo

Mensaje	HOLA
Emisor	Nodo 0 (<i>Other</i>)
Receptor	Nodo 1 (<i>Meter</i>)
Modo Nodo 0	C
Modo Nodo 1	S
Formato de paquete	A



Figura 44. Configuración del nodo 0 para el séptimo ensayo



Figura 45. Configuración del nodo 1 para el séptimo ensayo

Se observa que el número de paquetes enviados (114) desde el nodo colector (nodo 0) no son recibidos por el nodo de medición (nodo 0).

8.) OCTAVO ENSAYO

Tabla XXII. Octavo ensayo

Mensaje	HOLA
Emisor	Nodo 0 (<i>Other</i>)
Receptor	Nodo 1 (<i>Meter</i>)
Modo Nodo 0	T
Modo Nodo 1	C
Formato de paquete	A



Figura 46. Configuración del nodo 0 para el octavo ensayo



Figura 47. Configuración del nodo 1 para el octavo ensayo

Se observa que el número de paquetes enviados (170) desde el nodo colector (nodo 0) no son recibidos por el nodo de medición (nodo 1).

9.) NOVENO ENSAYO

Tabla XXIII. Noveno ensayo

Mensaje	HOLA
Emisor	Nodo 0 (<i>Other</i>)
Receptor	Nodo 1 (<i>Meter</i>)
Modo	T
Formato de paquete	B



Figura 48. Configuración del nodo 0 para el noveno ensayo



Figura 49. Configuración del nodo 1 para el noveno ensayo

Se observa que el número de paquetes enviados (174) desde el nodo colector (nodo 0) no son recibidos por el nodo de medición (nodo 0).

En general, como se ha podido observar la comunicación entre las placas es satisfactoria exceptuando los casos en los que el formato de paquete elegido es el formato B y cuando se combina el modo C con cualquiera de los otros dos modos.

6.2. COMUNICACIÓN ENTRE LAS PLACAS DE EVALUACIÓN DE RENESAS

En este caso, se dispone de 5 dispositivos MB-RA604S-02 identificados como: nodo 0, nodo 1, nodo 2, nodo 3 y *sniffer*. Los componentes de los dispositivos se pueden observar en la Figura 50 y Figura 51.

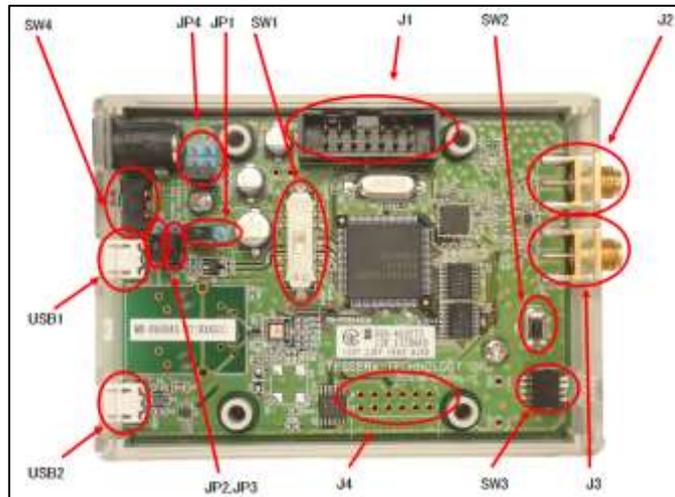


Figura 50. Componentes de MB-RA604S-02

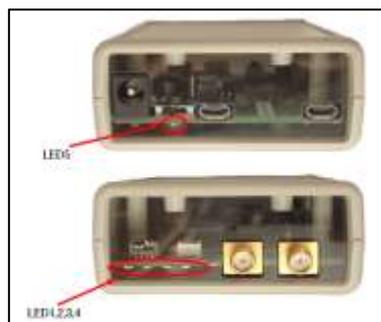


Figura 51. Leds de MB-RA604S-02

Además, se incluyen antenas, filtros y cables USB para cada uno de ellos. Y diferentes softwares como son: *Renesas Flash Programmer*, *Renesas Wi-SUN Demonstrator*, *Wi-SUN FAN developer GUI* y *Wireshark Renesas Edition*. Estos elementos se ven representados en la Figura 52.



Figura 52. Elementos Renesas

La Alianza Wi-SUN se centra en las redes inalámbricas de servicios públicos inteligentes y ha preparado documentos de especificación de perfiles técnicos que definen las pilas de protocolos. Las especificaciones resultantes cubren diferentes aspectos como los procedimientos de unión de redes, los mecanismos de seguridad y los protocolos de enrutamiento. Uno de los perfiles definidos en la alianza es el Wi-SUN FAN 1.0, que cubre las siguientes características:

- Capa física 802.15.4.
- Salto de frecuencia, descubrimiento/unión de redes y envío de protocolos.
- Conjunto de protocolos IPv6, incluido 6LoWPAN, gestión de direcciones, enrutamiento mediante RPL, reenvío *unicast* y *multicast*.
- Especificación de seguridad multicapa basada en estándares que abarca la autenticación, la autorización y la encriptación.

El *Renesas Wi-SUN Demonstrator* desarrollado por Renesas, muestra la capacidad de la implementación de la pila de protocolos de Wi-SUN FAN de Renesas ejecutándose en las placas de evaluación MB-RA604S-02 (RX651+RAA604S00) proporcionadas por Tessera.

La pila de protocolos Wi-SUN FAN de Renesas se puede observar en la Figura 53:

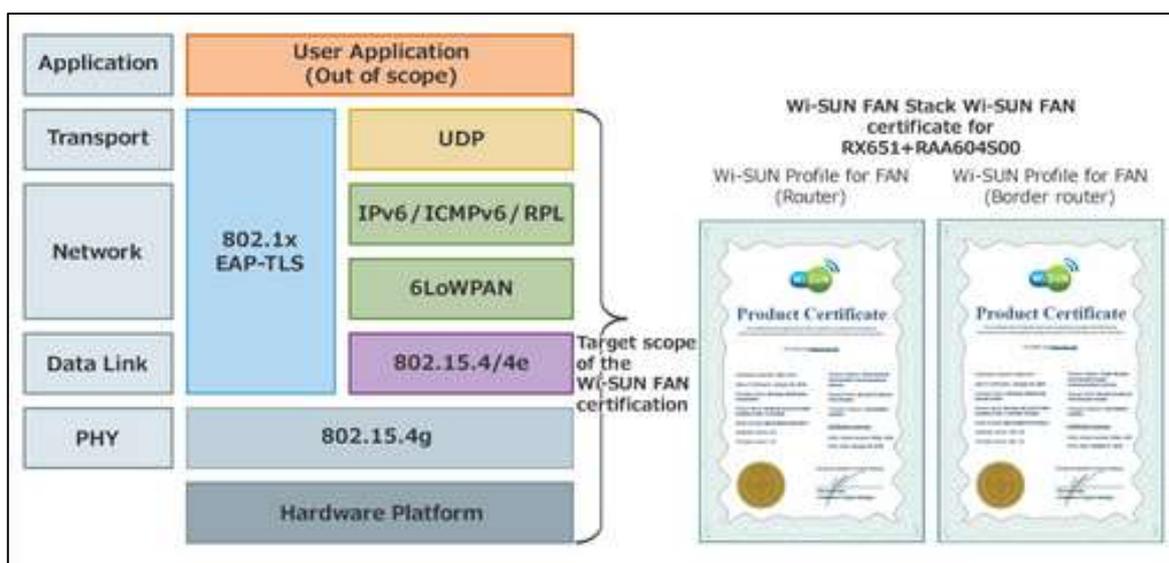


Figura 53. Pila de protocolos Wi-SUN FAN de Renesas

En cuanto a las características de transmisión (TX) y recepción (RX) del transceptor (dispositivo transmisor y receptor) RA604S00 reflejadas en sus especificaciones técnicas, se pueden observar en la Tabla XXIV y Tabla XXV.

Tabla XXIV. Características TX

Parámetro		Condiciones	Mín.	Típ.	Máx.
Máxima potencia TX		$3,6 \text{ V} \geq V_{\text{DDRF}} \geq 2,4 \text{ V}$	14,5 dBm	15,3 dBm	-
		$2,4 \text{ V} \geq V_{\text{DDRF}} \geq 1,8 \text{ V}$	-	13	-
Mínima potencia TX				-14 dBm	
Tamaño de paso variable		A menos de 6 dB de la máx. potencia de salida ($3,6 \text{ V} \geq V_{\text{DDRF}} > 2,4 \text{ V}$).	-	0,5	-
Variación de la potencia de salida de la transmisión		$3,6 \text{ V} \geq V_{\text{DDRF}} > 2,4 \text{ V}$ De -40 a 85 °C	-1,5 dBm	-	+1,5 dBm
Alta frecuencia	Armónicos de 2º orden	Con una salida de +13 dBm	-	-	-33 dBm
		Con una salida de +14,5 dBm	-	-	-31,5 dBm
	Armónicos de 3er orden	Con una salida de +13 dBm	-	-	-33 dBm
		Con una salida de +14,5 dBm	-	-	-31,5 dBm
*T _A = 25°C; V _{DDRF} = 3.0 V; V _{SSRF} = 0 V					

Tabla XXV. Características TX

Parámetro	Condiciones	Mín.	Típ.	Máx.
Sensibilidad de RX	2GFSK, BT=0,5, BER<0,1%, 10 kbps, m=0,5	-	-114 dBm	-109 dBm
	2GFSK, BT=0,5, BER<0,1%, 20 kbps, m=0,5	-	-111 dBm	-106 dBm
	2GFSK, BT=0,5, BER<0,1%, 40 kbps, m=0,5	-	-108 dBm	-103 dBm
	2GFSK, BT=0,5, BER<0,1%, 50 kbps, m=1	-	-107 dBm	-102 dBm
	2GFSK, BT=0,5, BER<0,1%, 100 kbps, m=0,5	-	-104 dBm	-99 dBm
	2GFSK, BT=0,5, BER<0,1%, 100 kbps, m=1	-	-105 dBm	-100 dBm
	2GFSK, BT=0,5, BER<0,1%, 150 kbps, m=0,5	-	-102 dBm	-97 dBm
	2GFSK, BT=0,5, BER<0,1%, 200 kbps, m=0,5	-	-101 dBm	-96 dBm
	2GFSK, BT=0,5, BER<0,1%, 200 kbps, m=1	-	-102 dBm	-97 dBm
	2GFSK, BT=0,5, BER<0,1%, 300 kbps, m=0,5	-	-97 dBm	-92 dBm
	4GFSK, BT=0,5, BER<0,1%, 200 kbps, m=0,33	-	-102 dBm	-97 dBm
	4GFSK, BT=0,5, BER<0,1%, 400 kbps, m=0,33	-	-100 dBm	-95 dBm

Nivel máx. de entrada		2GFSK	0	12	-
Radiación espuria		1 GHz o menos	-	-	-57 dBm
		1 GHz o más			-47 dBm
ED	Rango de entrada	2GFSK, BT = 0.5, 100 kbps, m = 1	-105 dBm	-	-5 dBm
	Precisión total	2GFSK, BT = 0.5, 100 kbps, m = 1	-5 dB	-	5 dB
*T _A = 25°C; V _{DDRF} = 3.0 V; V _{SSRF} = 0 V					

Los dispositivos previamente se programan mediante el *Renesas Flash Programmer* con el firmware apropiado. Antes de eso, se debe comprobar que las placas tienen el interruptor SW1 en modo *FLASH writer*. En este caso, cada nodo ha sido programado con un firmware diferente adjudicando una dirección MAC diferente a cada uno de ellos. En el caso del *Sniffer*, dispone de su firmware específico. En la Tabla XXVI se pueden ver estos firmwares.

Tabla XXVI. Firmware de los nodos

Nodo	Firmware
Nodo 0	Wi-SUN_FAN_74905000000000000000.mot
Nodo 1	Wi-SUN_FAN_74905000000000000001.mot
Nodo 2	Wi-SUN_FAN_74905000000000000002.mot
Nodo 3	Wi-SUN_FAN_74905000000000000003.mot
<i>Sniffer</i>	RFSnifferFW_tessera_raa604s00_rx651_board.mot

Una vez se han configurado los dispositivos, se vuelve a poner el interruptor SW1 en su operación normal.

A continuación, se inicia el software *Renesas Wi-SUN Demonstrator*. Este software proporciona una interfaz gráfica para manejar, analizar e interactuar con los dispositivos de apoyo al protocolo Wi-SUN. Es capaz de configurar los diferentes dispositivos, configurar y poner en marcha una red de área personal (PAN), permite la comunicación entre los nodos mediante envío de paquetes UDP e Ping ICMP, dispone de información de los nodos conectados (identificaciones, direcciones, vecinos, estado de ejecución...), ofrece una representación visual del estado actual de la red en forma de gráfico y disponen de un generador de tráfico que envía paquetes ICMP automáticamente.

Además, incluye la herramienta *Log* (registro) mediante la cual es posible la recuperación de información de registro de los nodos.

Una vez iniciado el software, se abre una pantalla de configuración en la que se determinan la capa física, el canal y la topología de red, entre otras cosas. En la Tabla XXVII se pueden ver las opciones que ofrece el software para la capa física.

Tabla XXVII. Configuración de la capa física del Demonstrator

Región	Velocidad	Rango de frecuencia	Ancho de canal	Número de canales
US	50 kb/s	902-928 MHz	200 kHz	129
US	150 kb/s	902-928 MHz	400 kHz	64
EU	50 kb/s	864-870 MHz	100 kHz	69
JP	50 kb/s	920-928 MHz	200 kHz	38

En este caso, lo más lógico sería usar la PHY que corresponde a Europa, por lo que todos los ensayos se desarrollan en esa configuración.

En cuanto a las topologías se puede elegir entre estrella (*star*), cadena (*chain*), diamante (*diamond*) y cuello de botella (*bottleneck*), que se pueden ver representadas en la Figura 54.



Figura 54. Topologías de red disponibles en la configuración de Renesas Wi-SUN Demonstrator

La topología estrella, es una topología de malla completa donde cada nodo puede comunicarse con todos los demás nodos (no se utiliza ninguna lista blanca). En la topología de cadena los nodos construyen una especie de cadena en la que un nodo tiene dos vecinos con el *border router* al principio de la cadena. En la topología diamante, dos nodos están directamente conectados al *border router* y el cuarto está conectado a esos dos nodos (pero no al *border router*). Por último, en la topología cuello de botella un nodo es conectado al *border router* y el resto se conectan a este nodo (pero no al *border router*).

También se puede variar la potencia de transmisión en la configuración, se dispone de 102 valores comprendidos entre -14,96 dBm y 15,43 dBm. Para los ensayos se utilizará siempre la más baja posible.

La transmisión de paquetes puede ser de manera manual o automática. Para la transmisión de paquetes manualmente existen tres modos:

- *Compact:*

Cómoda transmisión de mensajes PING o UDP en la red organizando los posibles nodos de origen y destino en una tabla. La transmisión puede configurarse mediante tres interruptores:

- *Verify:*

Determina si la recepción exitosa de un mensaje en su destino debe ser verificado o no.

- EDFE:

Permite la configuración del patrón de intercambio de trama. Si está desconectado, usa DFE (*Directed Frame Exchange*) si está conectado, EDFE (*Extended Directed Frame Access*). En el método EDFE, el mecanismo de acceso al canal utiliza un tiempo de retardo constante adicional (añadido al tiempo de retroceso) cuando el dispositivo de radio entra en una retransmisión, como cuando falla la evaluación de canal claro (CCA), o cuando no se recibe ningún ACK del dispositivo de radio objetivo. Este tiempo de retardo constante adicional no necesariamente resulta en la operación en un canal diferente, de modo que el salto de canal no puede ser explotado. El método EDFE permite tiempos de retroceso paralelos para diferentes dispositivos.

- *Large packets*:

Para elegir entre dos tamaños de carga.

- PING:

El origen se especifica por ID, el destino acepta ID o dirección IPv6, que permite la transmisión de paquetes *multicast* a través de la red. En este caso la carga se puede definir como *size*, una cadena (*string*) o una representación hexadecimal (*Hex*). Las opciones *Identifier* y *Secuence Number* son específicas de PING y también pueden establecerse explícitamente en esta pestaña. Ambas aceptan valores enteros entre 0 y 65535.

- UDP:

Igual que en PING pero en vez de *Identifier* y *Secuence Number* tiene *Source Report* y *Destination Port* (valores entre 0 y 65535).

Para el caso de la comunicación automática, incorpora un generador de tráfico que envía paquetes *Ping* automáticamente. Para ello, se debe especificar el número de rondas, el tiempo de retraso de paquete, el tiempo de espera de recepción del paquete y el tamaño (bytes).

Si es necesario, por ejemplo, en caso de detectar algún fallo, se inicia el *Wireshark Renesas Edition* para el *sniffer*. *Wireshark* es un analizador de paquetes de red, que presenta los datos de los paquetes capturados con el mayor detalle posible. Se inicia el programa y se elige el protocolo correspondiente, Renesas Wi-SUN FAN en este caso.

El *Wireshark Renesas Edition* permite seleccionar la configuración PHY que se puede ver en la tabla XX, el modo de Recepción FEC (*Forward Error Correction*), que puede estar deshabilitado, habilitado o automático, y el canal. Además, es posible descartar las tramas que fallan en la comprobación CRC y grabar información adicional del *sniffer* sobre la trama capturada o simplemente capturar las tramas 802.15.4 puras. Se debe elegir la misma configuración que se ha elegido previamente para la red creada en el *Renesas Wi-SUN Demonstrator* (EU 50 kb/s).

Tabla XXVIII. Configuración de la capa física del Wireshark

Región	Velocidad	Rango de frecuencia	Ancho de canal	Número de canales
US	50 kb/s	902-928 MHz	200 kHz	129
US	150 kb/s	902-928 MHz	400 kHz	64
EU	50 kb/s	864-870 MHz	100 kHz	69
EU	100 kb/s	864-870 MHz	200 kHz	35
JP	50 kb/s	920-928 MHz	200 kHz	38
JP	150 kb/s	920-928 MHz	400 kb/s	18

Por otro lado, como previamente se ha nombrado, se dispone del software *Wi-SUN FAN developer GUI*, que se puede utilizar para la instalación, configuración y operación de los dispositivos. Se ejecuta para cada una de las placas en serie especificando en puerto USB al que corresponde. A continuación, se configura el dispositivo especificando: tipo de dispositivo (*bourder router*, *router node*), ID del PAN, tamaño del PAN, nombre de la red y las características del a capa PHY como son, la banda PHY (EU 863-870 MHz), modo de operación (50 kbps), potencia de transmisión... Dispone de diferentes métodos para enviar un mensaje desde un emisor hasta uno o varios receptores. En una difusión amplia o *broadcast*, los datos son enviados

a todos los destinatarios de una red, pero en el caso de la *unicast*, los destinatarios se identifican individualmente.

A continuación, se realizan una serie de ensayos, mediante el *Renesas Wi-SUN Demonstrator*, que comprueban la comunicación entre estos dispositivos en diferentes situaciones.

Para todas las pruebas se ha utilizado la configuración que se puede ver en la Tabla XXVIII.

Tabla XXIX. Configuración Renesas Wi-SUN Demonstrator

Capa física	EU 50 kb/s
Canal	0
Número de canales	1
Potencia de transmisión	-14.41 dBm
Nombre de red	FanInterop
ID del PAN	acdc
Tamaño del Pan	16

Los ensayos realizados con los dispositivos de Renesas se pueden ver resumidos en la Tabla XXX.

Tabla XXX. Ensayos con los dispositivos de Renesas

Ensayos de comunicación		
A corta distancia		
1	Topología estrella (4 nodos)	
2	Topología cadena (4 nodos)	
3	Topología diamante (4 nodos)	
4	Topología cuello de botella (4 nodos)	
5	Atravesando una pared de hormigón (2 nodos)	
Alejando los dispositivos		
6	Distanciados 6 metros (2 nodos)	
7	Distanciados 6 metros (2 nodos situados en diferentes aulas)	
Atenuando la señal		
8	Atenuar la señal quitando antenas (2 nodos)	Sin quitar
9		Quitar Antena 1 del nodo 1
10		Quitar Antena 2 del nodos 1
11		Quitar Antena 1 y 2 del nodo 1
12		Quitar Antena 1 del nodo 0
13		Quitar Antena 2 del nodos 0
14		Quitar Antena 1 y 2 del nodo 0
15		Quitar Antena 1 del nodo 0 y nodo 1
16		Quitar Antena 2 del nodo 0 y nodo 1
17		Quitar Antena 1 del nodo 0 y Antena 2 del nodo 1
18		Quitar Antena 1 del nodo 1 y Antena 2 del nodo 0
19		Quitar Antena 1 y 2 del nodo 1 y Antena 1 del nodo
20		Quitar Antena 1 y 2 del nodo 1 y Antena 2 del nodo 0
21		Quitar Antena 1 y 2 del nodo 0 y Antena 1 del nodo 1
22		Quitar Antena 1 y 2 del nodo 0 y Antena 2 del nodo 1
23		Todas las antenas quitadas

24	Atenuar la señal metiendo un dispositivo en una caja metálica (2 nodos)	Meter el nodo 0 dentro de la caja metálica
25		Meter el nodo 0 dentro de la caja metálica forrada con papel de aluminio
26	Atenuar la señal poniendo un atenuador de n dB (2 nodos)	Atenuador de 10 dB en las dos antenas
27		Atenuador de 15 dB en las dos antenas
28		Atenuador de 19 dB en las dos antenas
29		Sin atenuación en la Antena 1 y con una atenuación de 21 dB en la Antena 2
30		Atenuación de 69 dB en la Antena 1 y ninguna atenuación en la Antena 2
31		Atenuación de 20 dB en las dos antenas
32		Atenuación de 30 dB en las dos antenas
33		Atenuación de 40 dB en las dos antenas
34		Atenuación de 50 dB en las dos antenas
35		Atenuación de 60 dB en las dos antenas
36		Atenuación de 80 dB en las dos antenas
37		Atenuación de 90 dB en las dos antenas
38		Atenuación de 100 dB en las dos antenas
39		Atenuación de 110 dB en las dos antenas

Antes de realizar las pruebas, se estima el alcance de esta tecnología mediante la fórmula (3), la fórmula de Friss. Primero, se deben determinar los parámetros que componen la fórmula en la que incógnita será la distancia entre las antenas (r).

La potencia de transmisión de la antena es la potencia seleccionada mediante *Reneas Wi-SUN Demonstrator* que tiene un valor de -14,41 dBm. Por otro lado, la ganancia de las antenas no se ha podido determinar, pero teniendo en cuenta que las antenas utilizadas son dipolo y sus ganancias oscilan entre 2 y 7 dBi, se utiliza el caso más desfavorable, que en este caso es 2 dBi.

La longitud de onda se determina con la fórmula (1), teniendo en cuenta el valor de la velocidad de la luz y la frecuencia a la que se transmite:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{864 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 0,347 \text{ m}$$

Para el valor de la potencia de recepción se utiliza el umbral máximo que detecta el dispositivo, teniendo en cuenta la configuración elegida previamente. En este caso, según las especificaciones técnicas del dispositivo sería de -102 dBm.

Con todos los datos de las variables se calcula la distancia que se puede mantener entre las antenas (r):

$$P_r = P_t + G_t + G_r + 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right) \rightarrow$$

$$\rightarrow (-102 \text{ dBm}) = (-14,41 \text{ dBm}) + 2 \text{ dBi} + 2 \text{ dBi} + 20 \log_{10} \left(\frac{0,347}{4\pi r} \right) \rightarrow r = 1,05 \text{ km}$$

Aunque se debe tener en cuenta que esta distancia es una distancia ideal, siendo la distancia en espacio libre. Es decir, sin tener en cuenta las posibles atenuaciones de los diferentes obstáculos que se encuentre entre los dos dispositivos.

1.) ENSAYOS DE COMUNICACIÓN DE LOS NODOS A CORTA DISTANCIA

Conectando todos los nodos a un mismo ordenador (distancia mínima entre ellos) se prueban las diferentes topologías de red en una potencia mínima, utilizando la configuración de la Tabla XXVIII.

a) TOPOLOGÍA: ESTRELLA

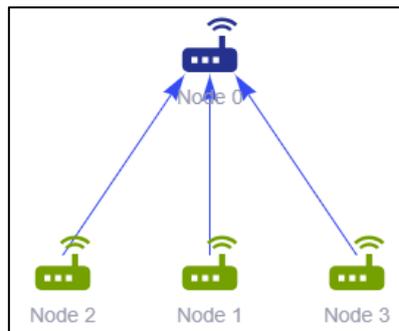


Figura 55. Prueba de topología estrella en el demostrador

#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74-90-50-00-00-00-01	2017.0.0.0.7690:5000:0.1	Has Route	3	3	100.00%
2	74-90-50-00-00-00-02	2017.0.0.0.7690:5000:0.2	Has Route	3	3	100.00%
3	74-90-50-00-00-00-03	2017.0.0.0.7690:5000:0.3	Has Route	3	3	100.00%

Figura 56. Comunicación mediante el generador de tráfico con topología estrella

b) TOPOLOGÍA: CADENA



Figura 57. Prueba de topología cadena en el demostrador

#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74-90-50-00-00-00-01	2017.0.0.0.7690.5000.0.1	Has Route	3	3	100.00%
2	74-90-50-00-00-00-02	2017.0.0.0.7690.5000.0.2	Has Route	3	3	100.00%
3	74-90-50-00-00-00-03	2017.0.0.0.7690.5000.0.3	Has Route	3	3	100.00%

Figura 58. Comunicación mediante el generador de tráfico con topología cadena

c) TOPOLOGÍA: DIAMANTE

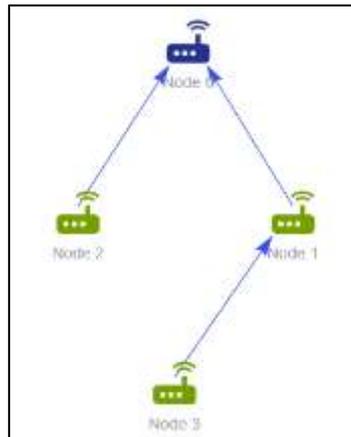


Figura 59. Prueba de topología diamante en el demostrador

#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74-90-50-00-00-00-01	2017.0.0.0.7690.5000.0.1	Has Route	3	3	100.00%
2	74-90-50-00-00-00-02	2017.0.0.0.7690.5000.0.2	Has Route	3	3	100.00%
3	74-90-50-00-00-00-03	2017.0.0.0.7690.5000.0.3	Has Route	3	3	100.00%

Figura 60. Comunicación mediante el generador de tráfico con topología diamante

d) TOPOLOGÍA: CUELLO DE BOTELLA

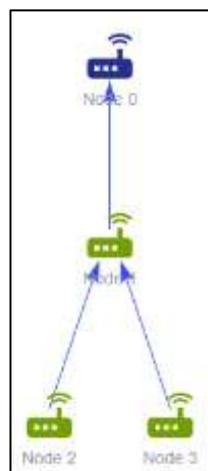


Figura 61. Prueba de topología cuello de botella en el demostrador

#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74-90-50-00-00-00-01	2017.0.0.0.7690.5000.0.1	Has Route	3	3	100.00%
2	74-90-50-00-00-00-02	2017.0.0.0.7690.5000.0.2	Has Route	3	3	100.00%
3	74-90-50-00-00-00-03	2017.0.0.0.7690.5000.0.3	Has Route	3	3	100.00%

Figura 62. Comunicación mediante el generador de tráfico con topología cuello de botella

Por otro lado, se hace una pequeña prueba de comunicación entre dos dispositivos (nodo 0 y nodo 1) a través de una pared de hormigón.

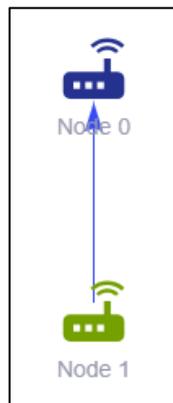


Figura 63. Comunicación entre dos nodos

#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74-90-50-00-00-00-01	2017.0.0.0.7690.5000.0.1	Has Route	3	3	100.00%

Figura 64. Comunicación mediante el generador de tráfico del nodo 0 y nodo 1

En general, se puede observar que a una distancia mínima (de pocos centímetros), se crean las diferentes topologías que ofrece el demostrador y es posible la comunicación entre los nodos de estas.

2.) ENSAYOS DE COMUNICACIÓN ALEJANDO LOS DISPOSITIVOS

Para llevar a cabo la comprobación de la comunicación de los nodos a más largas distancias y comprobar así la cobertura de la red, se deben conectar los dispositivos en diferentes ordenadores que se encuentran a una distancia considerable, o incluso en edificios diferentes. Al no ser posible su utilización en diferentes ordenadores, se pueden utilizar adaptadores para alejarlos lo máximo posible.

Se dispone de un alargador de aproximadamente 6 metros mediante el cual se han desarrollado diferentes ensayos de comunicación entre el nodo 0 (*border router*) y el nodo 1 (*router node*).

Para ello, se ha utilizado la configuración de la Tabla XXVIII, en la que se utiliza la potencia mínima.

Se prueba la comunicación dentro de una misma aula sin obstáculos, y como se puede ver en la Figura 65 el testeo se ha realizado con éxito:

#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74-90-50-00-00-00-01	2017.0.0.0.7590.5000.0.1	Has Route	10	10	100.00%

Figura 65. Comprobación de comunicación a 6 metros entre el nodo 0 y nodo 1

Se prueba la comunicación en dos aulas diferentes separadas por paredes, y como se puede ver en la Figura 66 el testeo también se ha realizado con éxito:

#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74-90-50-00-00-00-02	2017.0.0.0.7590.5000.0.2	Has Route	10	10	100.00%

Figura 66. Comprobación de comunicación a 6 metros entre el nodo 0 y nodo 2 situados en diferentes aulas

Aunque se ha podido comprobar que a una distancia de aproximadamente 6 metros los dispositivos mantiene la comunicación. Pero, esta distancia es muy pequeña para determinar la cobertura de la red.

3.) ENSAYOS DE COMUNICACIÓN ATENUANDO LA SEÑAL

Teniendo en cuenta que el concepto de atenuación se refiere a la pérdida de potencia de la señal, en estos ensayos se probará la comunicación entre dos dispositivos

Se prueba el funcionamiento de la red “haciendo que fallen las comunicaciones”. Para ello, se prueba la comunicación forzando varias situaciones: atenuar la señal quitando antenas, poner un atenuador de n dB y meter un dispositivo en una caja metálica (con un agujero para la antena).

- Atenuar la señal quitando antenas

Se prueba la comunicación entre dos dispositivos, el nodo 0 (*border router*) y el nodo 1 (*router node*), mediante el generador de tráfico de *Renesas Wi-SUN Demonstrator*, atenuando la señal quitando diferentes antenas de los dispositivos. La Antena 1 corresponde a J3 y la Antena 2 a J2, como se observa en la Figura 51.

- Sin quitar antenas

#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74-90-50-00-00-00-01	2017.0.0.0.7590.5000.0.1	Has Route	1	1	100.00%

Figura 67. Comprobación de comunicación entre dos nodos con antenas

Se observa que la comunicación es satisfactoria, siendo los *pings* enviados y recibidos en un 100%.

b) Quitar Antena 1 del nodo 1

MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
74-90-50-00-00-00-01	2017.0.0.0/24	Has Route	3	3	100.00%

Figura 68. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 del nodo 1

Se observa que la comunicación es satisfactoria, siendo los *pings* enviados y recibidos en un 100%.

c) Quitar Antena 2 del nodo 1

MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
74-90-50-00-00-00-01	2017.0.0.0/24	Has Route	3	3	100.00%

Figura 69. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 2 del nodo 1

Se observa que la comunicación es satisfactoria, siendo los *pings* enviados y recibidos en un 100%.

d) Quitar antena 1 y 2 del nodo 1

MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
74-90-50-00-00-00-01	2017.0.0.0/24	Has Route	3	3	100.00%

Figura 70. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 y Antena 2 del nodo 1

Se observa que la comunicación es satisfactoria, siendo los *pings* enviados y recibidos en un 100%.

e) Quitar Antena 1 del nodo 0

MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
74-90-50-00-00-00-01	2017.0.0.0/24	Has Route	3	3	100.00%

Figura 71. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 del nodo 0

Se observa que la comunicación es satisfactoria, siendo los *pings* enviados y recibidos en un 100%.

f) Quitar Antena 2 del nodo 0

MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
74-90-50-00-00-00-01	2017.0.0.0/24	Has Route	3	3	100.00%

Figura 72. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 2 del nodo 0

Se observa que la comunicación es satisfactoria, siendo los *pings* enviados y recibidos en un 100%.

g) Quitar Antena 1 y 2 del nodo 0

#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74:90:50:08:00:00:00:00	2017:0:0:7000:3000:0:1	Has Route	3	3	100.00%

Figura 73. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 y Antena 2 del nodo 0. Se observa que la comunicación es satisfactoria, siendo los *pings* enviados y recibidos en un 100%.

h) Quitar Antena 1 del nodo 0 y nodo 1

#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74:90:50:08:00:00:00:00	2017:0:0:7000:3000:0:1	Has Route	3	2	66.67%

Figura 74. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 y Antena 2 del nodo 0.

Se observa que la comunicación no es del todo satisfactoria (en un 66,67%), siendo los *pings* enviados 3 y los recibidos 2.

i) Quitar Antena 2 del nodo 0 y nodo 1

#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74:90:50:08:00:00:00:00	2017:0:0:7000:3000:0:1	Has Route	3	3	100.00%

Figura 75. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 2 del nodo 0 y nodo 1.

Se observa que la comunicación es satisfactoria, siendo los *pings* enviados y recibidos en un 100%.

j) Quitar Antena 1 del nodo 0 y Antena 2 del nodo 1

#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74:90:50:08:00:00:00:00	2017:0:0:7000:3000:0:1	Has Route	3	3	100.00%

Figura 76. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 del nodo 0 y nodo 1.

Se observa que la comunicación es satisfactoria, siendo los *pings* enviados y recibidos en un 100%.

k) Quitar Antena 1 del nodo 1 y Antena 2 del nodo 0

#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74:90:50:08:00:00:00:00	2017:0:0:7000:3000:0:1	Has Route	3	3	100.00%

Figura 77. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 del nodo 1 y Antena 2 del nodo 0.

Se observa que la comunicación es satisfactoria, siendo los *pings* enviados y recibidos en un 100%.

l) Quitar Antena 1 y 2 del nodo 1 y Antena 1 del nodo 0

#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	7a:9c:0d:0d:0d:0d:01	2017:0:0:79a0:0000:0:1	Not Route	0	0	0.00%

Figura 78. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 y Antena 2 del nodo 1 y Antena 1 del nodo 0

Se observa que la comunicación no es satisfactoria, siendo los *pings* enviados y recibidos en un 0%.

m) Quitar Antena 1 y 2 del nodo 1 y Antena 2 del nodo 0

#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	7a:9c:0d:0d:0d:0d:01	2017:0:0:79a0:0000:0:1	Not Route	0	0	100.00%

Figura 79. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 y Antena 2 del nodo 1 y antena 2 del nodo 0

Se observa que la comunicación es satisfactoria, siendo los *pings* enviados y recibidos en un 100%.

n) Quitar Antena 1 y 2 del nodo 0 y Antena 1 del nodo 1

#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	7a:9c:0d:0d:0d:0d:01	2017:0:0:79a0:0000:0:1	Not Route	0	0	0.00%

Figura 80. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 y Antena 2 del nodo 0 y Antena 1 del nodo 1

Se observa que la comunicación no es satisfactoria, siendo los *pings* enviados y recibidos en un 0%.

o) Quitar Antena 1 y 2 del nodo 0 y Antena 2 del nodo 1

#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	7a:9c:0d:0d:0d:0d:01	2017:0:0:79a0:0000:0:1	Not Route	0	0	100.00%

Figura 81. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando la Antena 1 y Antena 2 del nodo 0 y Antena 2 del nodo 1

Se observa que la comunicación es satisfactoria, siendo los *pings* enviados y recibidos en un 100%.

p) Todas las antenas quitadas

#	MAC Address	IP Address	Route Table	Sent	Received	Success Rate
1	74:4b:95:08:00:00:08:21	2017.0.0.0:7600:0000:0:1	RAS Route	0	0	0.00%

Figura 82. Comprobación de comunicación entre dos nodos quitando todas las antenas

Se observa que la comunicación no es satisfactoria, siendo los *pings* enviados y recibidos en un 0%.

En general, como se puede observar en el resumen de la Tabla XXV la comunicación entre los nodos es satisfactoria exceptuando los casos en los que la Antena 1 de los dos nodos es desconectada. Siendo la tasa de éxito de un 66,67% para el caso en el que esta se desconecta en ambos nodos, pero la Antena 2 de los dos nodos se mantiene conectada y de un 0% para el caso en el que se desconectan la Antena 1 de ambos y además se desconecta la Antena 2 de alguno de ellos o de ambos.

Tabla XXXI. Resumen ensayos de comunicación quitando antenas

	Nodo 0 (<i>border router</i>)		Nodo 1 (<i>router node</i>)		Tasa de éxito (%)
	Antena 1	Antena 2	Antena 1	Antena 2	
a)	X	X	X	X	100 %
b)	X	X		X	100 %
c)	X	X	X		100 %
d)	X	X			100 %
e)		X	X	X	100 %
f)	X		X	X	100 %
g)			X	X	100 %
h)		X		X	66,67 %
i)	X		X		100 %
j)		X	X		100 %
k)	X			X	100 %
l)		X			0 %
m)	X				100 %
n)				X	0 %
o)			X		100 %
p)					100 %

- Atenuar la señal metiendo un dispositivo en una caja metálica

En este caso, se utiliza una caja de metal para atenuar la señal a modo de jaula de Faraday. La jaula de Faraday, bloquea los campos electromagnéticos. Se dispone de una caja metálica en la que se introduce el nodo 0 y se comprueba la comunicación entre el nodo 0 y nodo 1. Puesto que el dispositivo debe conectarse al puerto USB del ordenador, esta quedaría un poco abierta, como se observa en la Figura 83.

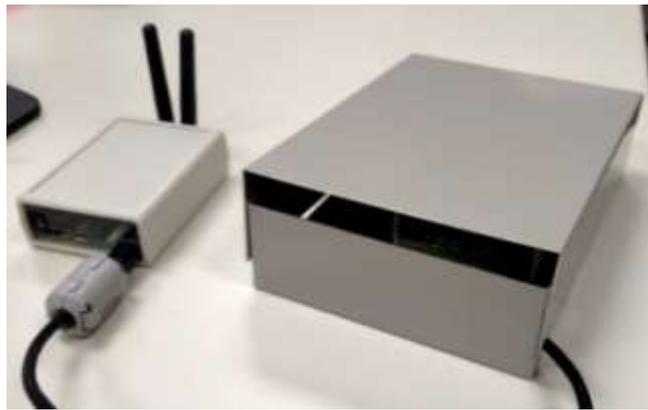


Figura 83. Atenuar la señal metiendo un dispositivo en una caja metálica

Traffic Generator					
MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
74-9c-9c-00-00-00-01	2017.0.0.7980.5000.0.1	Has Route	2	2	100.00%

Traffic Generator					
MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
74-9c-9c-00-00-00-01	2017.0.0.7980.5000.0.1	Has Route	19	19	100.00%

Figura 84. Comprobación de comunicación mediante el generador de tráfico metiendo un dispositivo en una caja metálica

Se comprueba mediante el testeo de PINGs que la comunicación no se ve interrumpida con el uso de la caja metálica. Pero, teniendo en cuenta su apertura se prueba a aislar más la caja mediante el uso de papel de aluminio, como se observa en la Figura 85.



Figura 85. Atenuar la señal metiendo un dispositivo en una caja metálica y papel de aluminio

Traffic Generator					
MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
74-9c-9c-00-00-00-01	2017.0.0.7980.5000.0.1	Has Route	19	19	100.00%

Figura 86. Comprobación de comunicación mediante el generador de tráfico metiendo un dispositivo en una caja metálica y utilizando papel de aluminio

De esta manera, la comunicación entre los dos dispositivos tampoco se ha visto interrumpida. Aunque, se debe tener en cuenta que el dispositivo no queda totalmente aislado porque el cable USB que lo conecta al ordenador no lo permite.

- Atenuar la señal poniendo un atenuador de n dB

Un atenuador es un dispositivo electrónico que reduce la potencia de una señal sin distorsionar apreciablemente su forma de onda.

En este caso, se atenúa la señal conectando atenuadores entre el dispositivo y las antenas. Para ello, se dispone de varios atenuadores fijos y variables, que se pueden ver en las siguientes figuras.

Los atenuadores variables están formados por resistencias, interruptores y diodos PIN utilizados para variar el nivel de atenuación. Los atenuadores resistivos fijos, en su mayoría, están formados por estructuras de tres resistencias conectadas en T o en π . [40]

- 2 atenuadores fijos de 6 dB



Figura 87. Atenuador fijo de 6 dB

- 1 atenuador variable de 0-9 dB



Figura 88. Atenuador variable de 0-9 dB

- 1 atenuador variable de 0-69 dB (que en toda la década de 20 no funciona)



Figura 89. Atenuador variable de 0-69 dB

- 2 atenuadores variables de 0-110 dB



Figura 90. Atenuador variable de 0-110 dB

Estos atenuadores se colocan junto con los correspondientes adaptadores para conectarlos al dispositivo por un lado y por otro lado a las antenas.

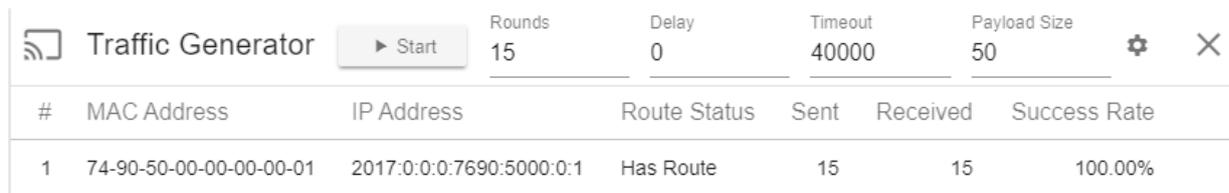
Para realizar los ensayos mediante el *Renesas Wi-SUN Demonstrator*, en la configuración se elige el valor de potencia mínimo de -14,96 dBm, considerando esta la potencia de salida de la antena transmisora.

A continuación, se desarrollan diferentes ensayos añadiendo atenuadores de diferentes dB entre las antenas del nodo 1, y comprobando su comunicación con el nodo 0.

- a) Atenuación de 10 dB en las dos antenas

A la Antena 2 se conecta un atenuador de 10 dB formado por el atenuador fijo de 6 dB y el atenuador variable de 0-9 dB colocado en 4 dB. A la Antena 1 se conecta un atenuador 10 dB utilizando el atenuador variable de 0-69 dB colocado en 10 dB (10+0 dB).

Se inicia el *Renesas Wi-SUN Demonstrator* para comprobar la comunicación entre los dispositivos mediante el generador de tráfico (ver Figura 91).



Traffic Generator							
		<input type="button" value="Start"/>	Rounds: 15	Delay: 0	Timeout: 40000	Payload Size: 50	<input type="button" value="X"/>
#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate	
1	74-90-50-00-00-00-01	2017:0:0:0:7690:5000:0:1	Has Route	15	15	100.00%	

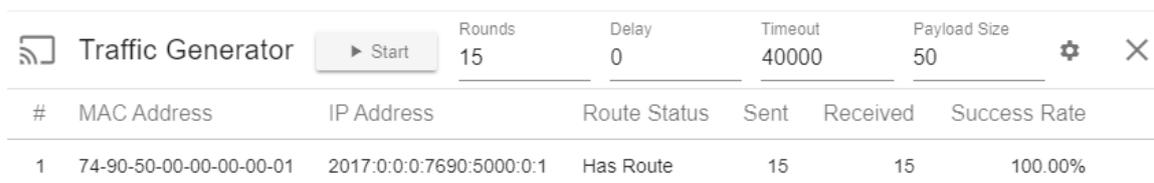
Figura 91. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 10 dB en las antenas de uno de los dispositivos

Mediante el testeo se puede ver que la comunicación entre los dos dispositivos es satisfactoria con una atenuación de 10 dB.

b) Atenuación de 15 dB en las dos antenas

En este caso, a la Antena 2 se conecta un atenuador de 15 dB formado por el atenuador fijo de 6 dB y el atenuador variable de 0-9 dB colocado en 9 dB. A la Antena 1 se conecta un atenuador 15dB utilizando el atenuador variable de 0-69 dB colocado en 15 dB (10+5 dB).

Mediante el generador de tráfico de *Renesas Wi-SUN Demonstrator* se comprueba la comunicación entre los dos dispositivos (ver Figura 92).



Traffic Generator							
		<input type="button" value="Start"/>	Rounds: 15	Delay: 0	Timeout: 40000	Payload Size: 50	<input type="button" value="X"/>
#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate	
1	74-90-50-00-00-00-01	2017:0:0:0:7690:5000:0:1	Has Route	15	15	100.00%	

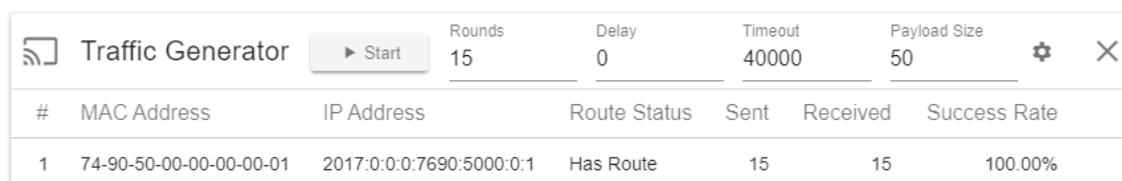
Figura 92. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 15 dB en las antenas de uno de los dispositivos

En este caso también, se siguen sin interrumpir las comunicaciones con una atenuación de 15 dB.

c) Atenuación de 19 dB en las dos antenas

En este caso, a la Antena 2 se conecta un atenuador de 19 dB formado por dos atenuadores fijos de 6 dB y el atenuador variable de 0-9 dB colocado en 7 dB. A la Antena 1 se conecta un atenuador 19 dB utilizando el atenuador variable de 0-69 dB colocado en 19 dB (10+9 dB).

Mediante el generador de tráfico de *Renesas Wi-SUN Demonstrator* se comprueba la comunicación entre los dos dispositivos (ver Figura 93).



Traffic Generator							
		<input type="button" value="Start"/>	Rounds: 15	Delay: 0	Timeout: 40000	Payload Size: 50	<input type="button" value="X"/>
#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate	
1	74-90-50-00-00-00-01	2017:0:0:0:7690:5000:0:1	Has Route	15	15	100.00%	

Figura 93. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 19 dB en las antenas de uno de los dispositivos

De igual manera que en los casos anteriores, la comunicación entre los dos dispositivos no se ve afectada con un atenuador de 19 dB.

d) , Sin atenuación en la Antena 1 y con una atenuación de 21 dB en la Antena 2

En este caso, a la Antena 2 se conecta un atenuador de 21 dB formado por dos atenuadores fijos de 6 dB y el atenuador variable de 0-9 dB colocado en 9 dB.

Mediante el generador de tráfico de *Renesas Wi-SUN Demonstrator* se comprueba que la comunicación entre los dos dispositivos es satisfactoria (ver Figura 94).



#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74-90-50-00-00-00-02	2017:0:0:7690:5000:0:2	Has Route	10	10	100.00%

Figura 94. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 21dB en la Antena 2 de uno de los dispositivos

e) Atenuación de 69 dB en la Antena 1 y ninguna atenuación en la Antena 2

A la Antena 1 se conecta un atenuador de 69 dB mediante el atenuador variable de 0-69 dB colocado en 69 dB.

Mediante el generador de tráfico de *Renesas Wi-SUN Demonstrator* se comprueba que la comunicación entre los dos dispositivos es satisfactoria (ver Figura 95).

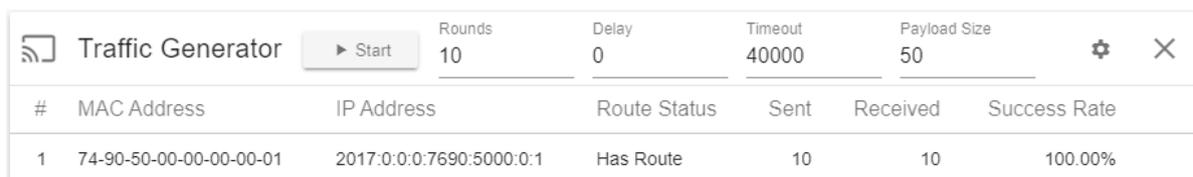


#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74-90-50-00-00-00-02	2017:0:0:7690:5000:0:2	Has Route	10	10	100.00%

Figura 95. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 69 dB en la Antena 1 de uno de los dispositivos

Viendo que las comunicaciones con estas atenuaciones (que ya son bastante elevadas) sigue permitiendo la comunicación entre los nodos, se prueba a utilizar atenuadores de una cantidad de dB superior. Se realizan pruebas utilizando atenuadores de 110 dB (Figura 90) en las dos antenas. Se prueba desde 20 dB hasta 110 dB aumentando 10 dB cada vez.

f) Atenuación de 20 dB en las dos antenas



#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74-90-50-00-00-00-01	2017:0:0:7690:5000:0:1	Has Route	10	10	100.00%

Figura 96. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 20 dB en cada antena

g) Atenuación de 30 dB en las dos antenas

Traffic Generator							
		<input type="button" value="Start"/>	Rounds: 10	Delay: 0	Timeout: 40000	Payload Size: 50	<input type="button" value="Settings"/> <input type="button" value="Close"/>
#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate	
1	74-90-50-00-00-00-01	2017:0:0:0:7690:5000:0:1	Has Route	10	10	100.00%	

Figura 97. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 30 dB en cada antena

h) Atenuación de 40 dB en las dos antenas

Traffic Generator							
		<input type="button" value="Start"/>	Rounds: 10	Delay: 0	Timeout: 40000	Payload Size: 50	<input type="button" value="Settings"/> <input type="button" value="Close"/>
#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate	
1	74-90-50-00-00-00-01	2017:0:0:0:7690:5000:0:1	Has Route	10	10	100.00%	

Figura 98. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 40 dB en cada antena

i) Atenuación de 50 dB en las dos antenas

Traffic Generator							
		<input type="button" value="Start"/>	Rounds: 10	Delay: 0	Timeout: 40000	Payload Size: 50	<input type="button" value="Settings"/> <input type="button" value="Close"/>
#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate	
1	74-90-50-00-00-00-01	2017:0:0:0:7690:5000:0:1	Has Route	10	0	0.00%	

Figura 99. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 50 dB en cada antena primer intento

Aunque parecía que la comunicación se estaba interrumpiendo porque el testeado da como resultado un 0 % de tasa de éxito (ver Figura 99), al repetir el ensayo el resultado ha sido de un 100 % (ver Figura 100).

Traffic Generator							
		<input type="button" value="Start"/>	Rounds: 10	Delay: 0	Timeout: 40000	Payload Size: 50	<input type="button" value="Settings"/> <input type="button" value="Close"/>
#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate	
1	74-90-50-00-00-00-01	2017:0:0:0:7690:5000:0:1	Has Route	10	10	100.00%	

Figura 100. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 50 dB en cada antena segundo intento

j) Atenuación de 60 dB en las dos antenas

Traffic Generator						
			Rounds	Delay	Timeout	Payload Size
			10	0	40000	50
#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74-90-50-00-00-00-01	2017:0:0:0:7690:5000:0:1	Has Route	10	10	100.00%

Figura 101. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 60 dB en cada antena

k) Atenuación de 70 dB en las dos antenas

Traffic Generator						
			Rounds	Delay	Timeout	Payload Size
			10	0	40000	50
#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74-90-50-00-00-00-01	2017:0:0:0:7690:5000:0:1	Has Route	10	10	100.00%

Figura 102. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 70 dB en cada antena

l) Atenuación de 80 dB en las dos antenas

Traffic Generator						
			Rounds	Delay	Timeout	Payload Size
			10	0	40000	50
#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74-90-50-00-00-00-01	2017:0:0:0:7690:5000:0:1	Has Route	10	10	100.00%

Figura 103. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 80 dB en cada antena

m) Atenuación de 90 dB en las dos antenas

Traffic Generator						
			Rounds	Delay	Timeout	Payload Size
			10	0	40000	50
#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74-90-50-00-00-00-01	2017:0:0:0:7690:5000:0:1	Has Route	10	10	100.00%

Figura 104. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 90 dB en cada antena

n) Atenuación de 100 dB en las dos antenas

Traffic Generator						
			Rounds	Delay	Timeout	Payload Size
			10	0	40000	50
#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate
1	74-90-50-00-00-00-01	2017:0:0:0:7690:5000:0:1	Has Route	10	10	100.00%

Figura 105. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 100 dB en cada antena

o) Atenuación de 110 dB en las dos antenas

Traffic Generator		Rounds	Delay	Timeout	Payload Size		
<input type="button" value="▶ Start"/>		10	0	40000	50		
#	MAC Address	IP Address	Route Status	Sent	Received	Success Rate	
1	74-90-50-00-00-00-01	2017:0:0:0:7690:5000:0:1	Has Route	10	10	100.00%	

Figura 106. Comprobación de comunicación entre dos nodos colocando un atenuador de 110 dB en cada antena

En ninguno de los casos, aunque la atenuación es muy elevada, se ve interrumpida la comunicación entre los nodos. Estos resultados no son lógicos, asique es posible que se hayan podido acoplar los cables en el montaje (se hizo en un espacio reducido y los dispositivos estaban muy cerca).

7. CONCLUSIONES

Después de hacer un análisis alrededor de la tecnología Wi-SUN y compararlo con otras tecnologías actuales, se puede afirmar que para aplicaciones de IoT, en la seguridad, la cobertura, el ecosistema y la escalabilidad favorecen las características de Wi-SUN.

Para probar esta tecnología, se han utilizado placas de evaluación de dos diferentes fabricantes (Rhom y Renesas), con los que se han desarrollado pruebas de configuración y conectividad.

Entre los dos fabricantes utilizados para las pruebas de comunicación de la tecnología, sin duda el kit de Renesas es la mejor opción. Ya que ofrece una configuración mucho más variada (topologías de red, potencias de transmisión, rangos de frecuencia...) y diferentes modos de comunicación entre los dispositivo (de manera manual y automática), todo de una manera mucho más visual y cómoda. También se debe tener en cuenta que el kit de Rohm sólo incluye 2 dispositivos a diferencia del kit de Renesas que incluye 5 (uno de ellos el *Sniffer*).

En cuanto a la comunicación entre los dispositivos de Rhom, como ya se ha nombrado, ha sido satisfactoria excepto los casos en los que el formato de paquete elegido es el formato B y cuando se combina el modo C con cualquiera de los otros dos modos. Se debe tener en cuenta que los ensayos se han desarrollado manteniendo una distancia de 4 metros entre los dispositivos.

En el caso de la comunicación entre los nodos de Renesas:

- Se ha comprobado el funcionamiento de las diferentes topologías que ofrece el demostrador, manteniendo la comunicación entre los nodos de las diferentes redes que se forman.
- Se han alejado lo máximo que ha sido posible mediante un alargador (6 metros) y se ha comprobado que se mantiene la comunicación, incluso si los dispositivos se encuentran separados por paredes de hormigón.
- Se han desconectado las antenas de los dispositivos y se ha comprobado que se pierde comunicación cuando la Antena 1 se desconecta en ambos nodos.
- Se ha aislado casi por completo uno de los dispositivos en una caja metálica forrada con papel de aluminio y la comunicación no se ha visto interrumpida.
- Se han conectado atenuadores de hasta 110 dB entre el dispositivo y sus antenas y se ha observado que el testeo de PINGs desarrollado mediante el demostrador ha sido satisfactorio. Estos resultados no son coherentes, porque muy pocas comunicaciones son capaces de soportar estas atenuaciones tan elevadas (las satélite). Es por eso que la única opción que se plantea es que a la hora de preparar el montaje, al conectar los dos dispositivos en un mismo ordenador y a muy poca distancia entre ellos en un espacio muy reducido, la señal haya podido acoplarse por algún cable. Y aunque la señal se haya atenuado correctamente por el aire, mediante ese acople por los cables la señal haya llegado al dispositivo receptor.

Por otro lado, se ha probado la comunicación entre los dispositivos de Rhom y de Renesas, pero ninguno de los softwares de los kits lo han permitido. Es decir, estos softwares no han detectado como nodo de su red un dispositivo de otro fabricante. En conclusión, la interoperabilidad entre las dos tecnologías probadas es nula.

Se debe tener en cuenta que Wi-SUN es una tecnología nueva que se está empezando a probar ahora y mediante estos ensayos se ha podido comprobar que la tecnología funciona incluso cuando se le ponen trabas a las comunicaciones. En consecuencia, se podría afirmar que por medio de esta tecnología, se puede mantener una comunicación bidireccional entre el contador inteligente y el concentrador de datos.

Por un lado, lo que esta tecnología aportaría a las redes inteligentes sería la posibilidad de que el proveedor de energía reciba los datos reales de los consumos de todos sus clientes de manera automática, sin la necesidad de acudir a sus hogares (reduciendo costes operativos) y pudiendo gestionar de forma eficiente la demanda.

Por otro lado, daría la posibilidad a los consumidores de conocer su consumo a tiempo real y el costo que este supone, consiguiendo unas facturas precisas y reales (sin estimaciones) y pudiendo economizar en función del precio de la energía.

Esta tecnología destaca por encima de las demás y tiene un futuro prometedor porque:

- Se basa en una red mallada que permite la conexión de múltiples dispositivos, en la que si un dispositivo falla los datos siguen siendo recibidos por otra ruta.
- Se implementa con niveles extremadamente bajos de consumo.
- Dispone de su propia infraestructura de clave pública, manteniendo la seguridad de cada dispositivo de la red.
- La tecnología Wi-SUN puede escalar en capacidad y en tamaño, gracias a su mayor ancho de banda.
- Además, dispone de una gama amplia de productos certificados e interoperables entre sí y todo ello a un coste bajo.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] REE, *Hacer posible la transición energética, RED ELÉCTRICA Y LA INTEGRACIÓN DE RENOVABLES*.
- [2] Energía y Sociedad, «¿Qué significa Transición Energética? ¿Cuáles son sus objetivos? ¿Qué implicaciones tiene?,» marzo 2020.
- [3] Energía y Sociedad, «La electrificación como clave para la descarbonización de la economía,» Mayo 2020.
- [4] G. D. «A survey on smart grid technologies and applications,» *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 2589-2525, 2020.
- [5] Energía y Sociedad, «SMARTGRIDS Redes eléctricas inteligentes,» Marzo de 2010.
- [6] A. Ghasempour, «Internet of Things in Smart Grid: Architecture, Applications, Services, Key Technologies, and Challenges,» 2019.
- [7] M. Alcaraz, «Internet de las Cosas,» *Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción*.
- [8] Y. F.M., «Xataka. IPv6: qué es, para qué sirve y qué ventajas tiene,» [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/basics/ipv6-que-sirve-que-ventajas-tiene>.
- [9] G. López, D. De la Vega, M. Castro, A. Arrinda, J. I. Moreno y A. Sendin, «The Role of Power Line Communications in the Smart Grid Revisited: Applications, Challenges, and Research Initiatives,» *IEEE*, 2019.
- [10] J. Cabeza, López-Vázquez, *Estudio de la situación actual de las smart grids*, 2016.
- [11] C. M. Cheminet, «Energía Informativa – Smart Metering,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.ceare.org/tesis/2018/tes22.pdf>.
- [12] Universidad de Valencia, «Tema 2. Redes de comunicación: Topología y enlaces,» [En línea]. Available: https://www.uv.es/rosado/courses/sid/Capitulo2_rev0.pdf.
- [13] «El modelo OSI,» [En línea]. Available: <http://www.exa.unicen.edu.ar/catedras/comdat1/material/ElmodeloOSI.pdf>.
- [14] J. Luque, Rodríguez y S. Clavijo, Suero, «Modulación de señales digitales,» *Universidad de Sevilla, departamento de tecnología electrónica*, 1995.
- [15] J. M. Orduna, Huertas, «Universidad de Valencia. Teoría y fundamentos de la modulación,» [En línea]. Available: <http://informatica.uv.es/iiguia/TSTD/apuntes/tema2.pdf>.
- [16] «GFSK modulation,» [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/nearcommunications/gfsk-modulation>.
- [17] «What is MSK: Minimum Shift Keying Modulation,» *electronicsnotes*.
- [18] C. Ubeda, «Proyecto fin de carrera : Estudio de un sistema CDMA-OFDM. Capítulo 2 :Modulación OFDM,» [En línea].
- [19] «Spread Spectrum Modulation,» [En línea]. Available: https://www.tutorialspoint.com/digital_communication/digital_communication_spread_spectrum_modulation.htm.
- [20] E. L. Peter, W. Endemann y R. Kays, «Improved Parallel Sequence Spread Spectrum Transmission for High Bandwidth Efficiency,» *IEEE*, 2020.
- [21] P. Zhang y H. Liu, «An Ultra-Wide Band System with Chirp Spread Spectrum Transmission Technique,» *IEEE*, 2006.
- [22] Institute of Electrical and Electronics Engineers, «IEEE Standard Computer Dictionary: A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries,» New York, 1990.

- [23] I. Diahovchenko, M. Kolcun, Z. Conka, V. Savkiv y R. Mykhailyshyn, «Progress and Challenges in Smart Grids: Distributed Generation, Smart,» *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, 2020.
- [24] «Redes Inalambricas Interiores. Capítulo 1: Introducción a las Redes Inalámbricas,» [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11761/fichero/Volumen1%252F5-Cap%C3%ADtulo1+-+Introducci%C3%B3n+a+las+redes+inal%C3%A1mbricas.pdf+>.
- [25] N. Andreadou, M. Olariaga, Guardiola y G. Fulli, «Telecommunication Technologies for Smart Grid,» *energies*, 2016.
- [26] S. Hernandez, Caballero, «Estudio en detalle de LoraWan. Comparación con otras tecnologías LPWAN considerando diferentes patrones de tráfico.,» 2020. [En línea]. Available: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/106369/7/shernandezc6TFM0120memoria.pdf>.
- [27] «COMPARING IOT NETWORKS AT A GLANCE,» *WiSUN Alliance*.
- [28] «Wi-SUN alliance,» [En línea]. Available: <https://wi-sun.org/>.
- [29] «Wi-SUN Alliance and FAN: Secure large-scale IoT networking for today and tomorrow,» [En línea]. Available: www.wi-sun.org.
- [30] D. Hotta, R. Okumura, K. Mizutani y H. Harada, «Stabilization of Multi-Hop Routing Construction in Wi-SUN FAN Systems,» de *IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, 2020.
- [31] *IEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 15.4: LR.WPANs*, 2011.
- [32] Y. Mun y H. K. Lee, « Internet Control Message Protocol for IPv6 (ICMPv6),» de *Understanding IPv6*, 2005.
- [33] D. Hotta, R. Okumura, K. Mizutani y H. Harada, «Stabilization of Multi-Hop Routing Construction in Wi-SUN FAN Systems,» *IEEE*, 2020.
- [34] A. Morillo, Canalejo, «Evaluación del rendimiento en el nivel de red RPL en WSN. Trabajo Fin de Grado Ingeniería de Telecomunicación,» 2017. [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/91091/fichero/TFG+ANTONIO+MORILLO+CANALEJO.pdf>.
- [35] R. Wayong, R. Okumura y H. Harada, «A Scheduling Scheme for Channel Hopping in Wi-SUN FAN Systems toward Data Throughput Enhancement,» *IEEE*.
- [36] «Wi-SUN FAN Overview. draft-heile-lpwan-wisun-overview,» 2017. [En línea]. Available: <https://tools.ietf.org/id/draft-heile-lpwan-wisun-overview-00.html>.
- [37] F. A. Candelas, Herías y J. Pomares, Baeza, «Universidad de Alicante. Protocolos de Transporte TCP y UDP,» [En línea].
- [38] J. Anguera y A. Pérez, «Teoría de las antenas. Guía de estudio.,» 2008. [En línea]. Available: http://www.salleurl.edu/semipresencial/ebooks/ebooks/ebook_teor%C3%ADa_antenas.pdf.
- [39] V. Mohan, «An Introduction to Wireless M-Bus,» *SILICON LABS*.
- [40] A. de la Rúa Lope, «ATENUADORES RESISTIVOS FIJOS,» [En línea]. Available: <http://agamenon.tsc.uah.es/Asignaturas/ittst/mic/apuntes/Trabajos.pdf>.