



Universidad de Jaén

Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

**ESTUDIO DE TECNOLOGÍAS
INALÁMBRICAS DE BAJO COSTE
PARA LA EXTENSIÓN DE THE
INTERNET OF THINGS AL HOGAR**

Alumno: Jaime Sánchez Lagares

Tutor: Prof. D. Juan Carlos Cuevas Martínez

Depto.: Ingeniería de Telecomunicación

Junio, 2016

Índice de contenido

1. RESUMEN.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
3. OBJETIVOS.....	4
4. ESTUDIOS PRELIMINARES: LA INTERNET DE LAS COSAS, REDES DE SENSORES Y DOMÓTICA.....	5
4.1. La Internet de las Cosas.....	5
4.2. Redes de sensores inalámbricos.....	11
4.3. Domótica.....	14
5. ESTUDIO DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS.....	16
5.1. Tecnologías inalámbricas según su alcance.....	16
5.2. Tecnologías inalámbricas según su topología.....	17
5.3. Wi-Fi.....	19
5.4. Bluetooth.....	21
5.5. ZigBee.....	22
5.6. 6LoWPAN.....	23
5.7. NFC.....	24
5.8. Comparativa entre tecnologías inalámbricas.....	25
5.9. Comparativa con tecnologías cableadas.....	29
5.9.1. Ethernet.....	29
5.9.2. PLC.....	30
5.9.3. KNX.....	32
6. ESTUDIO DE MERCADO DE LOS CHIP DE RADIO.....	33
6.1. Wi-Fi.....	33
6.1.1. Atmel ATSAMW25.....	33
6.1.2. Atmel ATWILC1000.....	34
6.1.3. Atmel ATWILC3000.....	34
6.1.4. Atmel ATWINC1500.....	34
6.1.5. Atmel ATWINC3400.....	34
6.1.6. Tabla comparativa de productos Atmel para Wi-Fi.....	34
6.1.7. Texas Instruments CC3200.....	35
6.1.8. Texas Instruments CC3200MOD.....	36
6.1.9. Tabla comparativa productos Texas Instruments para Wi-Fi.....	37
6.1.10. Digi Xbee Wi-Fi.....	37
6.2. Bluetooth.....	39
6.2.1. Texas Instruments CC2640.....	39
6.2.2. Texas Instruments CC2541.....	39
6.2.3. Texas Instruments CC2540.....	40
6.2.4. Texas Instruments CC2540T.....	40
6.2.5. Tabla comparativa de productos Texas Instruments para Bluetooth.....	40
6.2.6. Bluegiga BLE112.....	41
6.2.7. Bluegiga BLE113.....	41
6.2.8. Bluegiga BT121.....	41
6.2.9. Tabla comparativa de productos Bluegiga para Bluetooth.....	42
6.3. ZigBee.....	43
6.3.1. Atmel ATSAMR21E16A.....	43
6.3.2. Atmel ATSAMR21E17A.....	43
6.3.3. Atmel ATSAMR21E18A.....	44
6.3.4. Atmel ATmega256RFR2.....	44
6.3.5. Atmel ATmega128RFR2.....	44
6.3.6. Atmel ATmega64RFR2.....	44
6.3.7. Tabla comparativa de productos Atmel para ZigBee.....	45
6.3.8. Texas Instruments CC2530.....	46

6.3.9. Texas Instruments CC2531.....	46
6.3.10. Texas Instruments CC2538.....	46
6.3.11. Tabla comparativa de productos Texas Instruments para ZigBee.....	47
6.3.12. Digi Xbee ZigBee.....	48
6.4. 6LoWPAN.....	49
6.4.1. Texas Instruments CC2630.....	49
6.4.2. Texas Instruments CC2650.....	50
6.4.3. Tabla comparativa de productos Texas Instruments para 6LoWPAN.....	50
6.5. Otras opciones.....	51
6.5.1. Arduino.....	51
6.5.2. Raspberry Pi.....	52
6.5.3. BeagleBone.....	52
6.5.4. MinnowBoard.....	53
6.5.5. Windows 10 IoT.....	53
6.5.6. Google Brillo.....	54
6.5.7. Samsung SmartThings.....	54
6.5.8. Intel IoT Gateways.....	55
7. ANÁLISIS DE LA NORMATIVA ESPAÑOLA Y EUROPEA PARA LA INTEGRACIÓN DE DISPOSITIVOS INTELIGENTES EN EL HOGAR DIGITAL.....	56
7.1 El hogar digital.....	56
7.2. Estudio de la normativa.....	64
7.2.1. Requisitos de la Instalación.....	65
7.3. La Agenda Europea.....	69
7.4. Alianza para la Innovación Internet de las Cosas.....	75
7.5. Normativa en otros países fuera de la Unión Europea.....	76
8. ELECCIÓN DE TECNOLOGÍA INALÁMBRICA Y SU CHIP MÁS APROPIADO.....	78
8.1. Una primera aproximación a 6LoWPAN.....	78
8.2. Arquitectura de 6LoWPAN.....	79
8.2.1. IPv6 sobre IEEE 802.15.4.....	82
8.2.2. Compresión de cabecera, fragmentación y autoconfiguración de 6LoWPAN.....	83
8.3. 6LoWPAN con el SoC CC2650.....	87
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	90
9.1. Pila de protocolos.....	90
9.1.1. Capa IEEE 802.15.4.....	90
9.1.2. Capa IEEE 802.15.4 MAC.....	92
9.1.3. Capa 6LoWPAN.....	93
9.1.4. Capa IPv6.....	93
9.1.5. Capa UDP/TCP.....	93
9.1.6. Capa COAP.....	94
9.2. Interruptor eléctrico IoT.....	99
10. CONCLUSIONES.....	104
11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	112
ANEXO 1. DESCRIPCIÓN DE PINES DEL SOC CC2650.....	115

Índice de figuras

Figura 1: Evolución de dispositivos conectados.....	3
Figura 2: Ecuación del Internet de las Cosas.....	6
Figura 3: Hype Cycle de Gartner de 2014 para Tecnologías Emergentes.....	8
Figura 4: Tecnologías inalámbricas según su alcance.....	17
Figura 5: Topología punto a punto.....	17
Figura 6: Topología en árbol.....	18
Figura 7: Topología en anillo.....	18
Figura 8: Topología en estrella.....	18
Figura 9: Topología en malla.....	19
Figura 10: Gráfico del rango de tecnologías inalámbricas.....	25
Figura 11: Gráfico de la tasa de transferencia de las tecnologías inalámbricas.....	26
Figura 12: Gráfico del consumo de batería de las tecnologías inalámbricas.....	27
Figura 13: Gráfico de las topologías de las tecnologías inalámbricas.....	28
Figura 14: Ejemplo de conexión PLC.....	31
Figura 15: Instalación de PLC en el Hogar.....	31
Figura 16: ATSAMW25.....	33
Figura 17: ATWINC1500.....	34
Figura 18: ATWINC3400.....	34
Figura 19: CC3200.....	36
Figura 20: Xbee Wi-Fi.....	38
Figura 21: CC2640.....	39
Figura 22: CC2541.....	39
Figura 23: BLE112.....	41
Figura 24: BLE113.....	41
Figura 25: BT121.....	41
Figura 26: ATSAMR21E16A.....	43
Figura 27: ATmega256RFR2.....	44
Figura 28: CC2530.....	46
Figura 29: CC2531.....	46
Figura 30: CC2538.....	46
Figura 31: Xbee ZigBee.....	48
Figura 32: CC2630.....	49
Figura 33: CC2650.....	50
Figura 34: Arduino Uno.....	51
Figura 35: Arduino Mega.....	51
Figura 36: Raspberry Pi.....	52
Figura 37: BeagleBone.....	52
Figura 38: MinnowBoard.....	53
Figura 39: Gráfica objetivo empleo Agenda 2020.....	69
Figura 40: Gráfica objetivo inversión en desarrollo Agenda 2020.....	70
Figura 41: Gráfica objetivo reducción de gases Agenda 2020.....	70
Figura 42: Gráfica objetivo energías renovables Agenda 2020.....	71
Figura 43: Gráfica objetivo eficacia energética Agenda 2020.....	71
Figura 44: Gráfica objetivo reducción abandono escolar Agenda 2020.....	72
Figura 45: Gráfica objetivo educación superior Agenda 2020.....	72
Figura 46: Calendario del semestre europeo.....	73
Figura 47: Ejemplo de red mallada 6LoWPAN.....	80
Figura 48: Comparación pila de protocolos TCP/IP y 6LoWPAN.....	81
Figura 49: Formato de paquete 6LoWPAN.....	83
Figura 50: Formato de cabecera 6LoWPAN.....	84
Figura 51: Enrutamiento 6LoWPAN a nivel 2.....	86
Figura 52: Enrutamiento 6LoWPAN a nivel 3.....	86

Figura 53: Diagrama de conexión CC2650.....	88
Figura 54: Diagrama de Bloques de conexión CC2650 con sensores.....	89
Figura 55: Pila de protocolos 6LoWPAN.....	90
Figura 56: Envío de un mensaje confiable.....	95
Figura 57: Envío un de mensaje no confiable.....	96
Figura 58: Formato de mensaje CoAP.....	96
Figura 59: Circuito clásico de un interruptor eléctrico.....	99
Figura 60: Diagrama de Bloques del sensor de luz OPT3001.....	100
Figura 61: Circuito del sensor de luz OPT3001.....	100
Figura 62: Sensor de luz OPT3001 conectado al CC2650.....	101
Figura 63: Solución final IoT.....	102

Índice de tablas

Tabla 1: Estándares de red 802.11.....	20
Tabla 2: Protocolos de Bluetooth.....	21
Tabla 3: Tipos de dispositivos Bluetooth.....	22
Tabla 4: Comparación de tecnologías inalámbricas.....	24
Tabla 5: Tipos de IEEE 802.3 Ethernet.....	29
Tabla 6: Tabla comparativa de productos Atmel para Wi-Fi.....	35
Tabla 7: Tabla comparativa productos Texas Instruments para Wi-Fi.....	37
Tabla 8: Tabla comparativa de productos Texas Instruments para Bluetooth.....	40
Tabla 9: Tabla comparativa de productos Bluegiga para Bluetooth.....	42
Tabla 10: Tabla comparativa de productos Atmel para ZigBee.....	45
Tabla 11: Tabla comparativa de productos Texas Instruments para ZigBee.....	47
Tabla 12: Tabla comparativa de productos Texas Instruments para 6LoWPAN.....	50
Tabla 13: Tabla de puntuación de niveles del Hogar Digital.....	61
Tabla 14: Extracto de la Tabla de Servicios del Hogar Digital, Eficiencia Energética.....	62
Tabla 15: Valores del "Dispatch" en la cabecera de 6LoWPAN.....	84
Tabla 16: Códigos Métodos CoAP.....	97
Tabla 17: Códigos de respuesta CoAP.....	98
Tabla 18: Presupuesto de la solución final IoT.....	103

1. RESUMEN

Con la aparición de la Internet de las Cosas se abre un abanico de posibilidades en la industria y el mercado muy amplio. Una de ellas es su aplicación en el Hogar Digital, dando lugar a una evolución de la domótica actual. Pero al ser un concepto todavía en desarrollo, no hay aún un estándar que especifique las tecnologías a usar para conectar todos los dispositivos del hogar a la Internet de las Cosas. En este estudio se proponen las diferentes tecnologías disponibles para tal fin, y haciendo un análisis de la normativa y del mercado, se selecciona cuál es la solución más óptima para conseguir extender la Internet de las Cosas al Hogar Digital.

ABSTRACT

With the emergence of the Internet of Things a range of possibilities in the industry and quite broad market opens. One is its implementation in the digital home, leading to an evolution of the current home automation. But being a concept still in development, there is still a standard that specifies the technologies used to connect all devices in the home to the Internet of Things. In this study the different technologies available for this purpose are proposed, and making an analysis of the rules and the market, you select which is the best solution for extending the Internet of Things to Digital Home.

2. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se pretende hacer un estudio sobre las diferentes tecnologías inalámbricas actuales, y cual podría adaptarse mejor a la Internet de las Cosas, así como un análisis de mercado de los diferentes componentes de estas tecnologías y las normativas actuales para su aplicación. Todo ello, con el propósito de poder ofrecer una solución con bajo coste para la extensión de la Internet de las Cosas.

Con la evolución de la tecnología, tanto en telecomunicaciones como en electrónica, cada vez se pueden hacer procesadores más potentes en un tamaño más reducido, que permiten un mayor número de transistores en menor espacio, cumpliendo así la Ley de Moore, que establece que cada 1,5 años el número de transistores en un microprocesador se duplica.

Esto ha dado lugar a los llamados SoC (*System on a Chip*), es decir, sistemas completos de computación disponibles en un solo circuito integrado o chip. Con estos sistemas es posible dotar de capacidad de computación y comunicación a un mayor número de elementos de los que nos encontramos en la actualidad. Esto es, cada vez es más asequible dotar a más objetos de inteligencia, convirtiéndolos en dispositivos inteligentes como en su día pasó con los teléfonos o más recientemente con los relojes.

Ya no solo hay conectado en casa el ordenador de sobremesa que usaba toda la familia. Ahora, cada miembro de la casa (en la mayoría de los hogares) tiene su propio portátil, su propio teléfono inteligente e incluso su propia tableta, sin contar con que haya en el hogar una televisión inteligente conectada también a Internet. Según el estudio Techonomic Index 2015, realizado por Samsung, la media de dispositivos en los hogares españoles es de 19 dispositivos por hogar.

En 2011 Cisco realizó un estudio sobre la evolución del número de dispositivos conectados en función de la población mundial y la previsión del aumento que podría haber en los siguientes años [1].

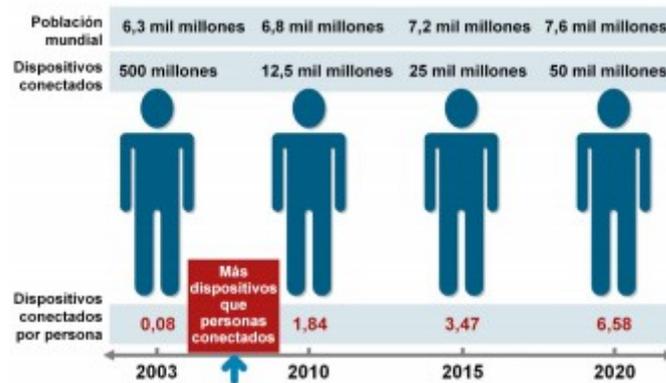


Figura 1: Evolución de dispositivos conectados

Según la estimación que realizaron, para el año 2020 puede haber unos 50 mil millones de dispositivos conectados a Internet, lo cual quiere decir casi 7 dispositivos conectados por persona. Con la Internet de las Cosas, la relación de dispositivo por persona irá en constante aumento, por lo que esta estimación puede llegar a quedarse incluso por debajo de la realidad.

Además, desde hace unos años se está intentando aplicar la domótica en los hogares, en busca de lograr una mayor eficiencia de recursos, un ahorro en el consumo y un mayor confort para los usuarios, pero hasta ahora su éxito en el mercado ha sido limitado. Por tanto, es muy interesante ampliar el concepto de domótica en el hogar extendiéndolo al Internet de las Cosas, dotando a todos los dispositivos del hogar de una inteligencia propia y un funcionamiento en base a la información de Internet, ofreciendo una actuación que no depende sólo de la programación o de sensores de los dispositivos.

Pero la Internet de las Cosas, al ser todavía un concepto relativamente nuevo, es posible que la mayoría de la gente no tenga una base sólida para hacerse una mejor idea de lo que es y lo que puede llegar a ser. Son muchos los fabricantes y empresas de telecomunicaciones que están diseñando ya sus propias soluciones propietarias, como Cisco con "IoT System", Samsung con "Artik" o Google con "Brillo". Sin contar con el gran número de alternativas en cuanto a tecnologías existentes para llevar a cabo la interconexión de todos los dispositivos que conformarán la Internet de las Cosas.

En este estudio se analizarán las diferentes tecnologías inalámbricas disponibles en el mercado actualmente orientadas a las redes de ámbito cercano (PAN, *Personal Area Network*), así como una revisión de las normativas actuales respecto a la domótica y al Hogar Digital, ofreciendo una solución comercial que integre la Internet de las Cosas en el hogar.

3. OBJETIVOS

Investigar entre las tecnologías inalámbricas orientadas a redes de ámbito cercano (WPAN, *Wireless Personal Area Network*) cuales serían las más apropiadas para su interacción en cada uno de los dispositivos eléctricos y electrodomésticos de una vivienda estándar.

Los objetivos principales del presente estudio son los siguientes:

- Análisis del mercado para obtener una representación apropiada de tecnologías inalámbricas que, por su bajo coste y versatilidad, facilitarán su integración en dispositivos eléctricos y electrodomésticos.
- Comparación con tecnologías cableadas: PLC, KNX, incluso Ethernet.
- Estudio de viabilidad. A través de una revisión en profundidad de la normativa española y europea, detallar los requisitos de la integración de dispositivos inteligentes en el hogar.
- Buscar y diseñar soluciones comerciales para la IoT. Analizar sus pros y sus contras.
- A través de la información encontrada, presentar una solución para la integración del chip de comunicaciones más apropiado para un interruptor eléctrico.

4. ESTUDIOS PRELIMINARES: LA INTERNET DE LAS COSAS, REDES DE SENSORES Y DOMÓTICA.

En este apartado, se estudiarán las tecnologías existentes, como las redes de sensores inalámbricos y la domótica, y las emergentes, como la Internet de las Cosas, que pueden dar el servicio de interconectar multitud de dispositivos para crear una red inteligente y que actúe en función de las necesidades del entorno.

Principalmente, se dará una visión en particular de cada tecnología y concepto, viendo su historia, su evolución y sus prestaciones actuales, o en el caso de las tecnologías emergentes, sus expectativas y las prestaciones que se esperan ofrecer, para finalmente dar una visión global de cómo estos tres conceptos pueden aunarse para conseguir el propósito del que se ocupa este documento, la extensión de la Internet de las Cosas al Hogar.

4.1. La Internet de las Cosas

La Internet de las Cosas, también conocido IoT por sus siglas en inglés (*The Internet of Things*), es la evolución de la Internet que conocemos hoy en día, donde todos, o la mayoría de los objetos cotidianos, estarán conectados a Internet y podrán comunicarse unos con otros e ir tomando decisiones que modifiquen su uso. Al ser objetos lo que se pretende interconectar, la Internet de las Cosas también es llamado la Internet de los Objetos. Incluso este concepto puede ser más ampliado, como por ejemplo ha hecho Cisco, que ha extendido la Internet de las Cosas a la Internet de Todo, loE por sus siglas en inglés *Internet of Everything*.

El término de Internet de las Cosas fue introducido por Kevin Ashton en 1999 mientras trabaja en el MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts) en el Centro de desarrollos Auto-ID, encargándose del desarrollo de sistemas de sensores e identificadores de radiofrecuencia, conocido como RFID [2].

Adrian McEwen y Hakim Cassimally en su libro “Internet de las Cosas: la tecnología revolucionaria que todo lo conecta” [3] establecen una ecuación bastante explicativa sobre lo que es la IoT:

$$\begin{array}{c} \text{Objeto físico} \\ + \\ \text{Controlador, sensor y actuadores} \\ + \\ \text{Internet} \\ = \\ \boxed{\text{Internet de las Cosas}} \end{array}$$

Figura 2: Ecuación del Internet de las Cosas

Se espera que IoT transforme la manera en la que vivimos y trabajamos. Desde su implementación en fábricas de automoción, llevar distintos tipos de sensores en el cuerpo, y hasta aplicaciones del hogar. IoT alcanzará cada faceta de nuestras vidas. Alrededor de nosotros habrá redes en constante cambio y evolución basado en nuestro entorno y entradas de otros sistemas.

La primera aplicación en la que se puede apreciar el interés real del Internet de las Cosas en estos momentos son los “coches conectados”. Muchas empresas están trabajando en desarrollar esta idea, que actualmente son las *VANETs (Vehicular Ad-Hoc Networks)*, donde cada coche es un nodo conectado a la red que actúa como emisor, receptor y router, de forma que va intercambiando información con el resto de nodos, los cuales son otros coches. Este tipo de redes usan protocolos propios como *AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector)*, donde se establece una ruta en la red en función de la demanda y solo se mantienen las rutas de la red que están en uso, de forma que se reduce la carga de la red cuando los nodos están comunicándose [4]. De esta manera, al detectarse los coches unos a otros, se evitan accidentes por error o descuido humano, se reduce considerablemente el tráfico en las ciudades al evitarse atascos, ya que son los propios coches los que van circulando y tomando rutas en función de la información que van intercambiándose.

A la par que los coches conectados, las empresas, en colaboración con algunos gobiernos, están poniendo especial interés en las “ciudades inteligentes”. Con la Internet de las Cosas se puede dotar a las ciudades de una infraestructura capaz de comunicarse a través de la red y facilitar la vida de los ciudadanos, a través de una serie de servicios que pueden ser [5]:

- Controlar la salud de la estructura de los edificios.
- Gestión de residuos.
- Control de la calidad del aire.
- Monitorización del ruido.
- Tratamiento de la congestión del tráfico.
- Control del consumo de energía de la ciudad.
- Aparcamientos inteligentes.
- Iluminación inteligente.

En España, una de las ciudades pioneras en implementar la infraestructura IoT para las ciudades inteligentes es Santander, con el proyecto *SmartSantander* en marcha desde el año 2009 [6]. El proyecto de la ciudad inteligente de Santander es un proyecto de referencia debido a su alcance, ya que está desplegando más de 20.000 dispositivos de la Internet de las Cosas, la mayoría en el área urbana de Santander y sus alrededores.

Recientemente, otra ciudad española que ha empezado a implementar un proyecto piloto para la Internet de las Cosas y las ciudades inteligentes ha sido Sevilla, utilizando una infraestructura de IPv6 para monitorizar algunos de los servicios de las ciudades inteligentes citados anteriormente, concretamente en la Plaza de España de Sevilla [7].

El ámbito de la salud también se presenta como un campo con muchas oportunidades para el IoT, ya que mediante dispositivos corporales inteligentes, personas con alguna dolencia o enfermedad podrán tener controles de sus funciones vitales y mandar un aviso a familiares o información en vivo al doctor, en caso de algún percance. O tener un control más exhaustivo de la medicación que se deba tomar, evitando descuidos o la ingesta equivocada de pastillas.

Otro ámbito donde el IoT adquiere una gran importancia es en la digitalización del hogar. Desde el aumento de la eficiencia energética mediante sistemas de luz que controlan el nivel de luminosidad en función de las personas que hay en una habitación o la cantidad de luz que va entrando por la ventana, hasta electrodomésticos inteligentes que vayan controlando su consumo en función del uso de la corriente eléctrica que se esté produciendo en la casa, evitando cortes de luz y derivados. La aplicación del IoT en

el hogar no tiene límites, se podrá tener por ejemplo, un despertador conectado a Internet que nos deje dormir un poco más si detecta que el tren que tenemos que coger va a llegar a la estación con un retraso considerable o ha sufrido una avería. O una nevera conectada al supermercado y que realice un pedido *online* si detecta en su interior la falta de algunos alimentos básicos que suele consumir el dueño. Telefónica y Telepizza han lanzado recientemente su servicio conjunto “*Click&Pizza*”, el cual consiste en un dispositivo que se puede colocar en la nevera como un imán y al pulsarlo hará un pedido automáticamente de la pizza que el usuario tenga especificada en su cuenta de Telepizza. Esto es solo un ejemplo de los muchos servicios que pueden darse con IoT y que poco a poco irán apareciendo hasta formar parte de nuestras vidas casi sin darnos cuenta.

La consultora Gartner, en su *Hype Cycle* de 2014 [8] para tecnologías emergentes, establece que la Internet de las Cosas se encuentra actualmente en su punto más alto de expectación, como puede apreciarse en la siguiente imagen [8]:

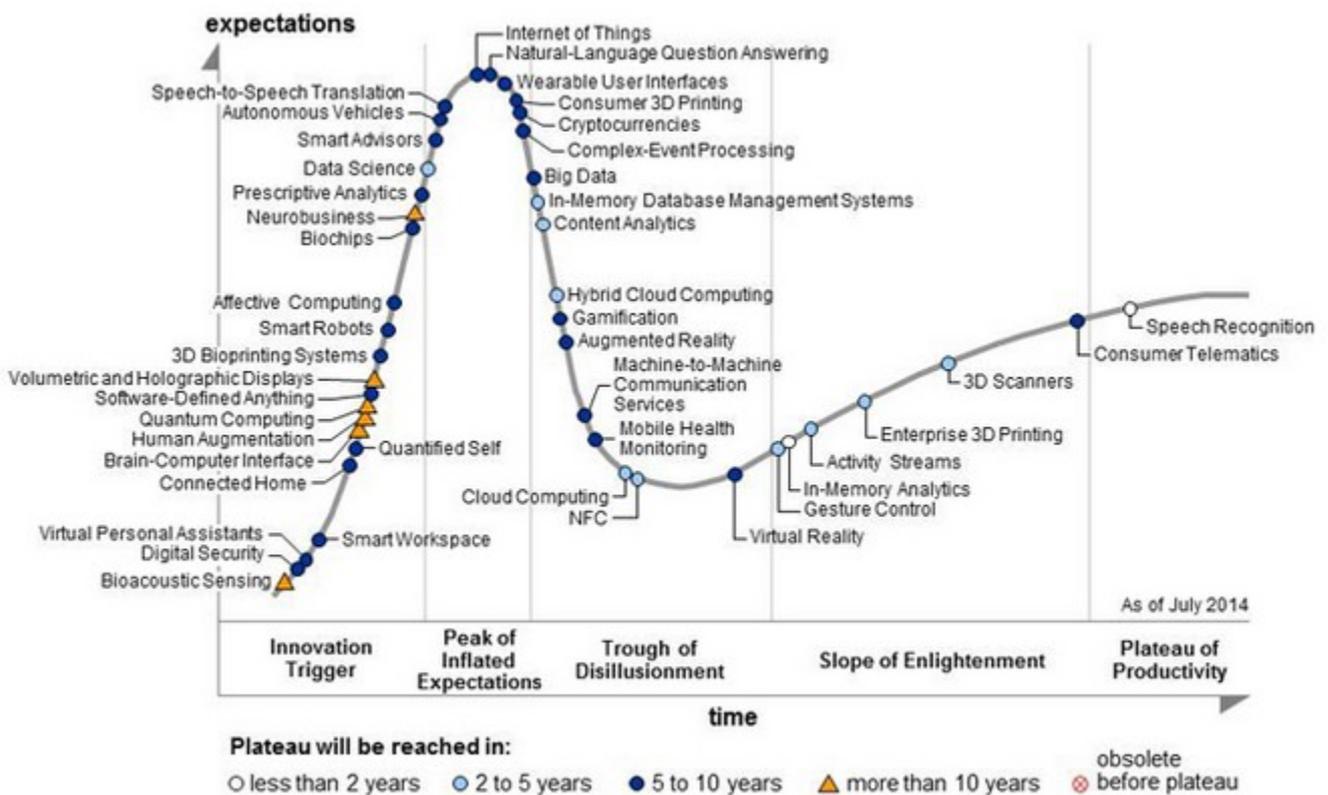


Figura 3: Hype Cycle de Gartner de 2014 para Tecnologías Emergentes

Según Gartner, la Internet de las Cosas estará entre nosotros de manera visible en torno a 5 ó 10 años en adelante (muchos fabricantes de la industria estiman que en torno a 2020). Al estar ahora en el pico de expectación, se estima que en los próximos años empiecen a haber decepciones respecto a lo que se espera y pruebas fallidas, para luego afianzarse como tecnología estándar en el mercado, llamado meseta de productividad según Gartner en su *Hype Cycle*.

La Internet de las Cosas presenta una serie de retos para conseguir que sea un estándar en la industria, y son muchos los fabricantes y empresas que están investigando distintas soluciones para intentar posicionarse como líderes en el mercado. Los principales retos de la Internet de las Cosas pueden clasificarse en estos cinco puntos [9]:

- **Alimentación de los dispositivos:** Todos los dispositivos que estén conectados de forma inalámbrica a la Internet de las Cosas deben consumir poca energía (en el caso de no disponer de alimentación externa permanente, de forma que su batería tenga una larga duración. El usuario no va a admitir que tenga que estar recargando constantemente todos los dispositivos que tenga conectados en su casa, como hace hoy en día con su smartphone, de forma que para facilitar la transición al IoT es vital que el consumo de energía de estos dispositivos sea mínimo.

- **Seguridad:** Con la mayoría de los datos siendo enviados por Internet, la seguridad es un deber. La creación de protocolos de seguridad específicos para la IoT tiene que ser un punto importante en el inicio del desarrollo de dispositivos para la Internet de las Cosas. Las comunicaciones deben estar a salvo de ataques o intentos de vulnerar la privacidad del usuario. También es importante la concienciación de la ciudadanía sobre la seguridad en la IoT, de forma que sean conscientes del uso correcto de la Internet de las Cosas.

- **Complejidad:** Añadir conectividad a todos los objetos que ya existen y que no tienen acceso a Internet. Esta transición se presenta como un gran hándicap para la rápida adopción de la Internet de las Cosas. Los usuarios no van a aceptar fácilmente cambiar su lavadora actual si funciona correctamente por una lavadora inteligente que se pueda conectar a Internet. O, volviendo al caso anterior del coche conectado, muchas personas no van a aceptar ceder el control de su coche al propio coche, que por mucha inteligencia y conectividad que tenga, no deja de ser una máquina. Son las nuevas

generaciones, más acostumbradas a un mundo conectado, las que deberán facilitar ese cambio. Además, los dispositivos que conformen la Internet de las Cosas deberán caracterizarse por su fácil uso y configuración, de forma que todos los consumidores sean capaces de abordar su configuración sin necesidad de tener conocimientos técnicos.

- **Rápida evolución:** La Internet de las Cosas se encuentra ahora mismo en constante cambio y evolución. Las empresas y fabricantes tienen una idea de lo que está por venir, pero en el fondo todo es desconocido. El mercado, el éxito y el grado de adopción que alcance la Internet de las Cosas entre los usuarios, irá marcando el camino a seguir. Por eso, los diseños y soluciones que se vayan haciendo para el IoT deben ser fácilmente escalables, de forma que puedan ir adoptando nuevas soluciones y actualizándose, sin quedarse obsoleto.

- **Conectividad:** No hay un estándar de conectividad que esté por encima del resto para la Internet de las Cosas. Son muchas las tecnologías inalámbricas y cableadas existentes hoy en día que pueden dar cabida al Internet de las Cosas. Y cada fabricante adopta alguna distinta para sus soluciones de la IoT. Por ello, hay que desarrollar una tecnología que sea estándar dentro de la Internet de las Cosas, o bien, crear un lenguaje común de intercambio de datos para que los dispositivos del IoT sea capaz de comunicar dichos datos entre ellos, independientemente de la tecnología que usen o cuál sea su fabricante.

Es en este reto donde profundizará este estudio, analizando las distintas opciones y dando una solución válida a la conectividad en la Internet de las Cosas.

4.2. Redes de sensores inalámbricos

Las redes de sensores inalámbricos, también conocidas como WSN (*Wireless Sensor Network*) son redes basadas en un conjunto de pequeños dispositivos electrónicos que recogen información del entorno mediante sensores. Estos dispositivos que conforman la red son conocidos como “motas”, proveniente de la traducción de la palabra inglesa “mota de polvo”. Las motas envían la información recogida a un controlador principal que se encarga de monitorizar la información del entorno y de actuar en consecuencia con dicha información.

Las redes de sensores inalámbricos presentan habitualmente una topología de red en malla, lo cual permite tener mayor robustez frente a fallos o caída de los nodos, ya que si un nodo sufriese un percance, la información del resto de los nodos seguiría otra ruta alternativa sin afectar al funcionamiento de la red de sensores.

Otra característica importante de las redes de sensores inalámbricos es la capacidad de los nodos de entrar en un modo de suspensión, en el cual consumen muy poca batería cuando no están siendo utilizados dentro de la red. Cuando los nodos son requeridos por la red para recoger información del entorno entonces se activan. Esto hace que la vida de la batería de los dispositivos que forman la WSN tenga una duración bastante más larga. En algunos dispositivos se pueden colocar también paneles solares que vayan recargando las baterías en horas de luz solar, como por ejemplo en una red de sensores que controle los valores de luz y humedad en un campo de cultivo en los que los dispositivos pueden estar en contacto con la luz solar.

Por tanto, las redes de sensores inalámbricos pueden estar constituidas por diferentes tipos de sensores [10], entre otros:

- De temperatura.
- De humedad.
- De detección de movimiento de vehículos.
- De condiciones de luz.
- De presión.
- De nivel de ruido.

Esta variedad de sensores da lugar a que las redes de sensores inalámbricos tengan uso en diferentes aplicaciones, como pueden ser:

- **Aplicaciones militares:** donde las redes de sensores inalámbricos pueden ser utilizadas para monitorizar el estado de las tropas, equipamiento y munición, realizar reconocimiento de terreno en situaciones adversas, o detectar y reconocer ataques nucleares, biológicos y/o químicos.
- **Aplicaciones ambientales:** donde las redes de sensores inalámbricos pueden ser utilizadas para detectar incendios forestales, detectar y prevenir inundaciones u obtener información del cultivo para realizar una agricultura más precisa.
- **Aplicaciones para la salud:** donde las redes de sensores inalámbricos pueden ser utilizadas para monitorizar datos fisiológicos de los pacientes, realizar un seguimiento y supervisión de los médicos y pacientes del hospital, así como de la administración y disponibilidad de los medicamentos que se encuentren en el hospital.
- **Aplicaciones para el hogar:** estas son las aplicaciones relacionadas con este estudio, donde las redes de sensores inalámbricos pueden ser utilizadas para la automatización del hogar, o el desarrollo de un entorno inteligente que proporcione diferentes facilidades a los usuarios.
- **Otras aplicaciones comerciales:** donde las redes de sensores inalámbricos pueden ser utilizadas para el control ambiental en edificios de oficinas, la creación de museos interactivos o el seguimiento y la detección de vehículos, llegando a poder formar una *VANET (Vehicular Ad-Hoc Network)*.

En la actualidad, existen diferentes protocolos de enrutamiento en las redes de sensores inalámbricos que permiten que estas redes puedan ofrecer todas sus prestaciones para las aplicaciones que se han comentado. Estos protocolos de enrutamiento son clasificados según tres categorías básicas [11]:

- **Centrados en los datos:** ejemplos de este tipo de protocolos de enrutamiento son *SPIN, GBR, CADR, COUGAR* y *ACQUIRE*.
- **Jerárquicos:** ejemplos de este tipo de protocolos de enrutamiento son *LEACH, TEEN, APTEEN, PEGASIS* y *GAF*.
- **Basados en localización:** ejemplos de este tipo de protocolos de enrutamiento son *Shah and Rabaey, MECN, SMECN, GEAR* y *SPEED*.

Algunos de estos protocolos pueden pertenecer a más de una de estas tres categorías, como es el caso del protocolo *GAF*, que es tanto jerárquico como basado en localización, o el protocolo *Shah and Rabaey*, que es tanto centrado en datos como basado en localización.

Otros aspectos secundarios a la hora de clasificar estos protocolos puede ser que ofrezcan calidad de servicio (QoS), agregación de datos o flujo de red.

4.3. Domótica

Según la Asociación Española de Domótica e Inmótica (CEDOM), la domótica se define como *“el conjunto de tecnologías aplicadas al control y la automatización inteligente de la vivienda, que permite una gestión eficiente del uso de la energía, que aporta seguridad y confort, además de comunicación entre el usuario y el sistema”* [12].

Por tanto, la domótica puede explicarse como un conjunto de dispositivos con sensores (es decir una WSN como las explicadas en el punto anterior) pero ubicadas en el hogar y aplicadas a las necesidades propias de una vivienda. Esto es, mientras en las redes de sensores inalámbricos se propusieron varios ejemplos de como las WSN podían maximizar el cultivo, controlar incendios forestales o desbordamientos de ríos, la domótica estaría orientada por ejemplo a la eficiencia energética de la casa controlando el apagado o encendido de las luces en función de si hay personas en la habitación o no, o el consumo de los electrodomésticos de la casa.

La diferencia entre la domótica y la extensión de la Internet de las Cosas al hogar que se pretende adoptar en este estudio es que en la domótica los dispositivos tienen una inteligencia limitada, ya que no son los propios objetos los que toman las decisiones según la información recogida, los datos de Internet y la comunicación entre ellos, si no que recogen la información del entorno y la envían a un dispositivo central o controlador que es el que se encarga de tomar las decisiones en función de dicha información. O bien es el propio usuario el que por medio de una aplicación, desde su smartphone por ejemplo maneja las decisiones de la casa estando dentro de ella o fuera.

Un ejemplo podría ser el sistema de aire acondicionado que se encuentra en muchos hogares actualmente. Mediante una programación previa, el sistema puede activar el aire caliente a una determinada hora y durante un espacio de tiempo. Por ejemplo si se sale de trabajar a las 15:00 horas, previamente se ha podido programar el aire para que se active a las 14:00 horas hasta las 15:00 horas para que cuando se llegue a la casa ya haya una temperatura agradable y se pueda consumir la energía en otra tarea, conectar la vitrocerámica por ejemplo. Sin embargo, si ese día por ejemplo tras salir del trabajo no se vuelve a casa porque ha surgido una comida de negocios y el usuario se olvida de desactivar el aire desde su aplicación móvil, el aire se activará igualmente, malgastándose. Con la Internet de las Cosas no pasaría eso, ya que el sistema del aire acondicionado a través de Internet, podría localizar mediante GPS la localización del usuario de forma que solo cuando éste ya haya salido del trabajo y se

esté dirigiendo a la casa se activaría el aire.

A lo largo de la historia de la Domótica, se han utilizado diferentes protocolos ya existentes en otras tecnologías, como por ejemplo X10 y se han creado otros más específicos, como HAL2000 [13], a la vez que se han adoptado diferentes estrategias en el desarrollo de la domótica. Al principio, la domótica solo se encargaba de la automatización y el control de los equipos domésticos, con una limitada interacción entre dichos dispositivos. Esta estrategia, junto a una ausencia de protocolos de comunicaciones unificados, una alta complejidad de uso y mantenimiento de equipos, hizo que las altas expectativas que generó la domótica en el mercado se convirtiese en pesimismo y desconfianza hacia la domótica [14].

En los últimos años, esta estrategia se ha ido cambiando en busca de conseguir que el usuario sea el centro de atención de los dispositivos, buscando su confort y seguridad, en lugar de centrarse en los dispositivos como se llevaba haciendo anteriormente. Esto ha dado lugar a un nuevo crecimiento de la domótica, con ejemplos como las viviendas domóticas creadas por la empresa Home Systems en Madrid en 2010 que cubren la gestión de seguridad, control, detección de fugas de luz o agua e iluminación. O la catedral de Múnich, en Alemania, automatizada por la empresa LONMARK, capaz de monitorizar el control de luz, el sistema de alarma o la vigilancia por cámara [15].

5. ESTUDIO DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS

En este punto se expondrán las principales tecnologías inalámbricas presentes en el mercado hoy en día y que a priori se estima que serán las tecnologías predominantes en la Internet de las Cosas.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) tiene reservadas varias bandas de frecuencia para aplicaciones Industriales, Científicas y Medicinales (ISM). Las bandas ISM más populares en los últimos años son las de 433 MHz, 868 MHz, 915 Mhz y 2.4 GHz, repartiéndose entre diferentes áreas geográficas del planeta. De todas estas bandas, la más usada es la de 2.4 GHz ya que se usa a nivel mundial [16].

Por lo general, frecuencias altas ofrecen más canales y más ancho de banda, además pueden soportar redes más grandes y mayor flujo de datos. Sin embargo, las frecuencias bajas propagan mejor las ondas de radio.

5.1 Tecnologías inalámbricas según su alcance

Según el rango de alcance las redes se clasifican normalmente en cuatro tipos principales[16], que son:

- Redes de área personal (**PAN**, del inglés *Personal Area Network*), que suelen tener un alcance de 10 metros. Estas redes son utilizadas por los dispositivos corporales inteligentes, por ejemplo, un teléfono inteligente que llevamos en el bolsillo conectado por Bluetooth a un reloj inteligente que llevamos en la muñeca.
- Redes de área local (**LAN**, *Local Area Network*), que suelen tener un alcance de 100 metros. Estas redes son las más utilizadas actualmente en los hogares y en muchos centros de trabajo, tanto de forma cableada (mediante Ethernet) o inalámbrica (mediante Wi-Fi) que son las conocidas **WLAN**, *Wireless Local Area Network*.
- Redes de área metropolitana (**MAN**, *Metropolitan Area Network*), pueden tener un alcance de hasta 25 kilómetros, ofrece conexión a un conjunto de edificios o a una comunidad de vecinos.
- Redes de área extensa (**WAN**, *Wide Area Network*), pueden cubrir una región muy amplia de terreno, o incluso teóricamente a todo el planeta.

En la siguiente figura se puede apreciar de una forma visual la clasificación de este tipo de redes.

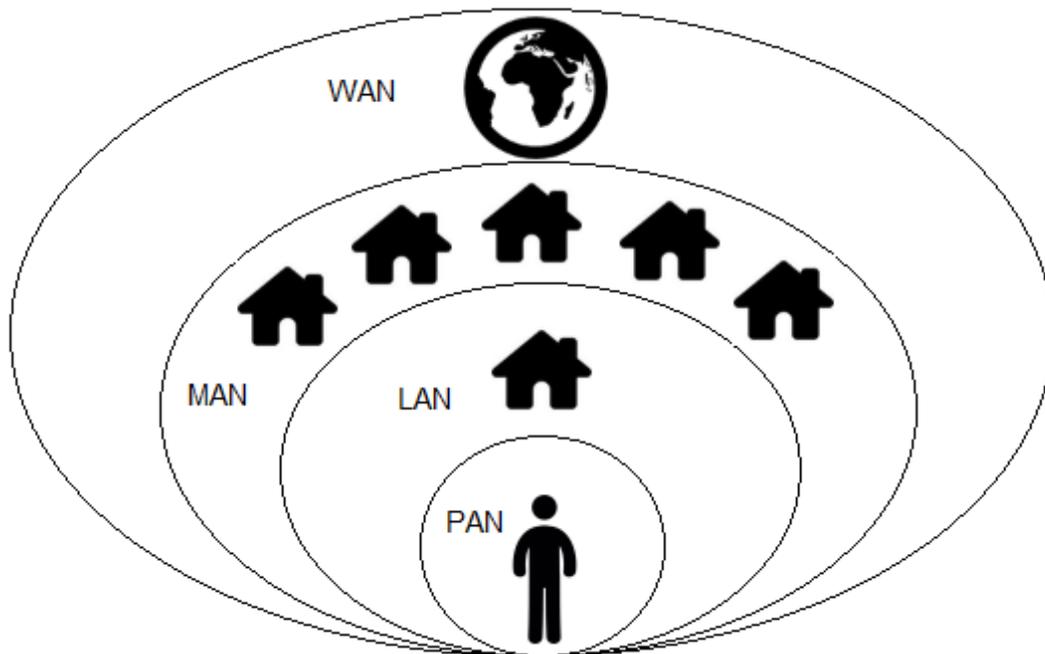


Figura 4: Tecnologías inalámbricas según su alcance

5.2. Tecnologías inalámbricas según su topología

Las tecnologías inalámbricas también pueden clasificarse por su topología destacando las siguientes:

- **Punto a Punto:** En esta topología el nodo se conecta directamente con el nodo que se quiere conectar, o su nodo vecino.



Figura 5: Topología punto a punto

- **Árbol:** En esta topología hay un nodo padre del que van saliendo nodos hijos (o nodos hoja) creando varias conexiones troncales.

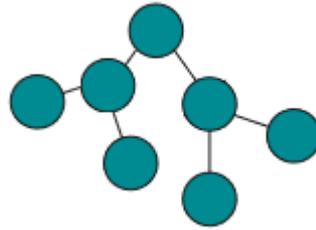


Figura 6: Topología en árbol

- **Anillo:** En esta topología todos los nodos se conectan entre sí formando un lazo cerrado.

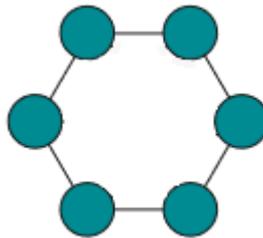


Figura 7: Topología en anillo

- **Estrella:** En esta topología todos los nodos están conectados a un nodo central por el que pasan todos los datos antes de llegar a su destino. Esta topología es la más extendida en las redes LAN y WLAN que utilizamos en los hogares, donde el nodo central es el router que da acceso a Internet al resto de nodos de la red como pueden ser los PC's o los teléfonos inteligentes.

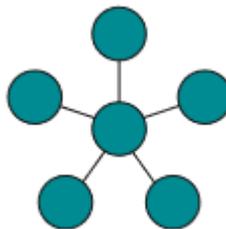


Figura 8: Topología en estrella

- **Malla:** En esta topología todos los nodos de la red están conectados unos con otros, de forma que no hay un nodo central y todos los nodos actúan como enrutadores. Por tanto si un nodo se cae, la red no estará afectada. Este tipo de topología es muy usada y muy útil en las redes de sensores inalámbricos que explicamos en el punto 4.2.

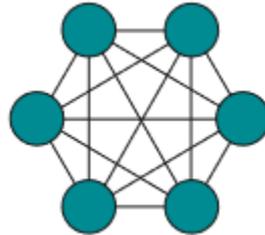


Figura 9: Topología en malla

Las topologías que más interesarían según lo visto hasta ahora para la extensión de la Internet de las Cosas al hogar serían la topología en estrella y la topología en malla.

Una vez estudiados los principales aspectos de las redes inalámbricas, es hora de entrar en detalle con cada una de las tecnologías inalámbricas que pueden usarse para crear dichas redes.

5.3. Wi-Fi

El IEEE 802.11 nace en 1990 con el objeto de definir el uso de los dos niveles inferiores de la arquitectura o modelo OSI (capa física y capa de enlace de datos), especificando sus normas de funcionamiento en una red de área local inalámbrica (WLAN).

Wi-Fi Alliance agrupa a fabricantes de equipos 802.11 para certificar y garantizar la compatibilidad de equipos. Las diferentes generaciones de esta tecnología son [17] [18]:

- 802.11 (1997): Alcanza velocidades de hasta 2 Mbps (1 Mbps real) con una frecuencia de 2.4 Ghz y un ancho de banda de 22 MHz.
- 802.11b (1998): Alcanza velocidades de hasta 11 Mbps (6 Mbps reales) con una frecuencia de 2.4 Ghz y un ancho de banda de 22 MHz.

- 802.11g (2003): Alcanza velocidades de hasta 54 Mbps (22 Mbps reales) con una frecuencia de 2.4 Ghz y un ancho de banda de 20 MHz.
- 802.11n (2009): Alcanza velocidades de hasta 600 Mbps (100 Mbps reales) con una frecuencia de 2.4 Ghz y/o 5.4 Ghz y un ancho de banda de 40 MHz.
- 802.11ac (2013): Alcanza velocidades de hasta 6.93 Gbps (100 Mbps reales) con una frecuencia de 5.4 Ghz y un ancho de banda de 80 Mhz hasta 160 MHz.

A continuación se presenta una tabla resumen donde se ve más claramente las especificaciones de los diferentes estándares de 802.11 [19]:

Estándares de red 802.11				
Estándar 802.11	Frecuencia (GHz)	Ancho de banda (MHz)	Velocidad de transmisión (Mbps)	Radio de cobertura aproximado (m)
802.11	2.4	20	1,2	20-100
802.11a	3.7/5	20	6,9,12,18,24,36,48,54	35-120
802.11b	2.4	20	5.5, 11	38-140
802.11g	2.4	20	6,9,12,18,24,36,48,54	38-140
802.11n	2.4/5	20	7.2,14.4,21.7,28.9,43.3,57.8,65,72.2	70-250
		40	15,30,45,60,90,120,135,150	
802.11ac	5	160	Tasa entre estaciones → 1 Gbps Tasa máxima por enlace → 500 Mbps	?
802.11ad	2.4/5	Compatible 802.11b/a/n/a c 7 GHz	Hasta 7 Gbps	Depende

Tabla 1: Estándares de red 802.11

El estándar 802.11 es una tecnología de bajo coste con un funcionamiento en bandas libres de frecuencias y un rendimiento teórico superior al de tecnologías WAN equivalentes como UMTS, en cambio presenta una cierta serie de limitaciones como una transmisión dependiente del entorno, aspectos legales que varían de una zona geográfica a otra, dificultad para el control de ancho de banda disponible y un rendimiento inferior al de tecnologías LAN cableadas.

Un sistema 802.11 se compone de una o varias estaciones de cliente inalámbrico con una interfaz 802.11, que normalmente es un PC o un smartphone en los hogares comunes, y un punto de acceso con una interfaz 802.11 y otra cableada, que suele ser el router inalámbrico que nos ofrecen los proveedores de servicio.

Los sistemas 802.11 pueden encontrarse en modo infraestructura (el más común), en modo Ad-Hoc (para circunstancias específicas) o en modo malla (híbrido entre infraestructura y Ad-Hoc).

5.4. Bluetooth

Estándar Industrial para WPAN que usa banda de 2,4 MHz para transmisión de voz y datos. El estándar 802.15.1 Bluetooth es un estándar abierto de las empresas que forman el *Bluetooth Special Interest Group (SIG)* [20] que se encarga de su publicación y que especifica:

- La interfaz de radio
- El conjunto de protocolos y componentes disponibles para los desarrolladores.
- Soluciones por defecto para cada aplicación, denominadas "*Application Profiles*".

Dentro de esta especificación, cabe destacar los siguientes protocolos y aplicaciones que dan lugar al correcto funcionamiento de Bluetooth:

Protocolos	Aplicaciones
Radio Frequency COMMunications	Implementación de LANs Acceso a Internet
Telephony Control Specification BINary	Acceso a servicios de telefonía pública Intercomunicación
Attention commands	Acceso telefónico a redes
Object EXchange	Sincronización Transferencia de ficheros

Tabla 2: Protocolos de Bluetooth

Un sistema Bluetooth 802.15.1 está formado por las llamadas *Piconet* o las *Scatternet* cuyas definiciones son las siguientes: una *Piconet* está formado por un dispositivo "Maestro" que es el que establece la *Piconet* y uno o varios dispositivos "Esclavos". Estos dispositivos "Esclavos" pueden ser de tres tipos, a saber:

- Esclavo activo: identificados por una *Active Member Address* de 3 bits.
- Esclavo estacionado: identificados con una *Parked Member Address* de 8 bits.
- Esclavo en espera: dispone únicamente de la dirección física de la interfaz, de 48 bits.

Cuando un dispositivo en cobertura de dos *Piconets* adopta alternativamente el papel de “Esclavo activo” en cada una de las *Piconets*, se forma una *Scatternet*.

Así mismo, los dispositivos Bluetooth pueden clasificarse en diferentes tipos, atendiendo a su potencia:

Tipo	Potencia máxima	Alcance
Power class 1	100 mW	100 metros
Power class 2	2.5 mW	10 metros
Power class 3	1 mW	2 metros

Tabla 3: Tipos de dispositivos Bluetooth

Siendo los más habituales los “*Power class 2*”.

Las diferentes generaciones del estándar Bluetooth 802.15.1 son [21][22]:

- Bluetooth v1.2 (2002): Alcanza velocidades de hasta 721 Kbps
- Bluetooth v2.0 (2004): Alcanza velocidades de hasta 3 Mbps (2.1 Mbps reales)
- Bluetooth v3.0 (2009): Alcanza velocidades de hasta 24 Mbps
- Bluetooth v4.0 (2010): Mismas velocidades que la v3.0, pero con la novedad de que introduce el Bluetooth de bajo consumo (*Bluetooth Low Energy*, en adelante *Bluetooth LE*, o *Bluetooth Smart*), que reduce el consumo y permite velocidades de 1Mbps.

5.5. ZigBee

ZigBee es un conjunto de protocolos comunicación inalámbrica mediante radiodifusión digital de bajo consumo basada en el estándar IEEE 802.15.4 de WPAN. El objetivo de ZigBee son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y un periodo bastante amplio de vida útil de sus baterías.

ZigBee alcanza velocidades de hasta 250 Kbps. Actualmente, es la tecnología más utilizada en el ámbito de la domótica ya que entre las ventajas de sus características destacan [23]:

- Dispositivos sencillos y de bajo coste.
- Capacidad de adoptar topologías de red en malla, árbol y estrella
- Bajo consumo de energía.

Los dispositivos ZigBee operan en la banda de frecuencias ISM de 2.4 GHz a través de 16 canales con un ancho de banda de 5 MHz cada uno. Para evitar colisiones durante la transmisión se utiliza el protocolo CSMA/CA al igual que ocurre en el estándar Wi-Fi, IEEE 802.11.

Dentro de un sistema ZigBee se pueden encontrar tres tipos de dispositivos:

- Coordinador ZigBee (ZC): este dispositivo tiene que existir obligatoriamente en toda red ZigBee, ya que se encarga de controlar toda la red y las rutas que deben seguir los dispositivos para conectarse entre si.
- Router ZigBee (ZR): ofrece nivel de aplicación dentro de la torre de protocolo ZigBee, ya que interconecta los nodos para poder ejecutar el código, e interconecta dispositivos separados en la topología de la red.
- Dispositivo final ZigBee (ZED): realiza funciones específicas de control o sensor. Posee funcionalidad necesaria para conectarse al nodo ZC o ZR, pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos. El ZED tiene requerimientos mínimos de memoria y es el dispositivo más barato de la red ZigBee.

5.6. 6LoWPAN

6LoWPAN (*IPv6 Over Low Power Wireless Personal Area Network*) es un estándar que permite el uso de IPv6 sobre redes basadas en el estándar IEEE 802.15.4. Está conformado por una colección de estándares definidos en el RFC 4919 por IETF, y que posibilita que los dispositivos de una red inalámbrica de área personal se puedan conectar por IP. El término "*Personal Area Network*" en el acrónimo 6LoWPAN puede dar lugar a confusión ya que 6LoWPAN se suele usar típicamente para LANs (*Local Area Network*).

El estándar fue creado por el "6LoWPAN Working Group" del IETF en el año 2005 y formalizado en la RFC 6282 en septiembre de 2011. Como se indica en el título de la

RFC, el estándar 6LoWPAN solo define una adaptación eficiente entre la capa de enlace 802.15.4 y la pila TCP/IP.

Por tanto, 6LoWPAN permite emplear como medio físico el estándar 802.15.4 y como estándar de comunicación a IPv6. Se selecciona IPv6 como protocolo de comunicación, ya que es el único estándar que permite interoperabilidad con la infraestructura de la red existente a la vez que asigna una dirección IP única a cada dispositivo de la IoT [24]. A su vez, se seleccionó IPv6 excluyendo a IPv4 ya que soporta un rango de direccionamiento más amplio, por tanto redes más grandes, y también porque soporta una auto-configuración de red.

A continuación, se presenta una tabla donde se comparan las diferentes tecnologías inalámbricas vistas hasta ahora [25][26][27]:

Nombre	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee	6LoWPAN
Estándar	802.11	802.15.1	802.15.4	802.15.4
Aplicaciones	Web, E-mail, Video	Sustituto del cable	Monitorización y control	Monitorización y control
Sistema	1Mb+	250 kB+	4Kb - 32Kb	4 - 32 Kb
Duración batería (días)	1 - 5	1 - 7	100 - 1000+	100 - 365+
Tamaño de red	32	7	255	65536
Máxima transferencia (Kb/s)	11000+	720	20 - 250	Hasta 250
Rango (metros)	1 - 100	1 - 10+	1 - 75+	1 - 100

Tabla 4: Comparación de tecnologías inalámbricas

5.7. NFC

NFC (*Near Field Communication*) es una tecnología de comunicación inalámbrica, de corto alcance que funciona en la banda de los 13.56 Mhz.

Alcanza velocidades de hasta 424 Kbps.

Sin embargo, su rango de alcance es tan solo de 20 cm, por lo que casi se descarta para el propósito de este estudio (hay muchos elementos en un hogar que están separados por más de 20 cm, por lo que no podrían comunicarse mediante NFC) [28].

5.8. Comparativa entre tecnologías inalámbricas

Una vez hecho un análisis de cada una de las tecnologías inalámbricas predominantes en la actualidad, se muestran unas tablas comparativas [16] donde se aprecian los aspectos más importantes a tener en cuenta entre ellas para nuestro objetivo, tales como el rango de alcance, la tasa de transferencia, el consumo típico de batería y la topología típica.

- Rango

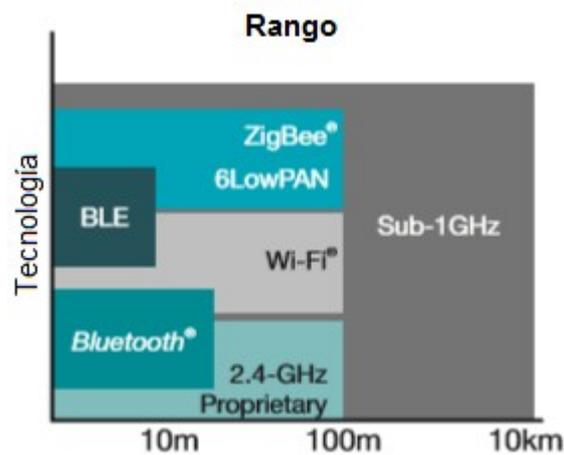


Figura 10: Gráfico del rango de tecnologías inalámbricas

Se puede apreciar que el Bluetooth tiene un alcance en torno a los 10 metros (algo menos el Bluetooth Smart, BLE), lo cual nos daría conexión para dispositivos conectados en una misma habitación (dos como mucho), pero sería insuficiente para dispositivos alejados en la casa.

En cambio, ZigBee, 6LoWPAN, Wi-Fi y las tecnologías propietarias de 2.4Ghz alcanzarían los 100 metros, lo cual sería suficiente para interconectar dispositivos de una casa. Las tecnologías Sub 1Ghz alcanzan distancias de hasta 10 Km, lo cual es demasiado para nuestro propósito que es aplicar la Internet de las cosas al Hogar.

Por tanto, en función del rango de alcance, de las tecnologías que se han visto se seleccionarían por ahora con ZigBee, 6LoWPAN y Wi-Fi, descartando el Bluetooth.

- Tasa de transferencia

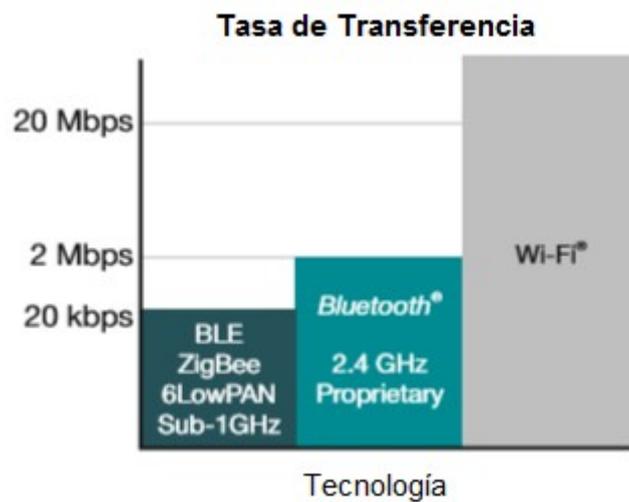


Figura 11: Gráfico de la tasa de transferencia de las tecnologías inalámbricas

Hoy en día la tasa de transferencia no es un problema, ya que con las tecnologías inalámbricas cada vez se consiguen mayores velocidades de transmisión. Sin embargo, para el propósito que ocupa este trabajo (interconectar dispositivos en el hogar mediante la IoT) no es necesario un alto nivel de tasa de transferencia, por tanto este aspecto a priori no va a limitar la elección de la tecnología inalámbrica.

En un futuro puede que al aumentar el volumen de datos que intercambien los dispositivos conectados, se necesiten mayores velocidades, pero seguramente también las tecnologías como Bluetooth Smart, ZigBee y 6LoWPAN ofrezcan una mayor tasa de transferencia de las que ofrecen ahora con Kbps.

- Consumo de batería

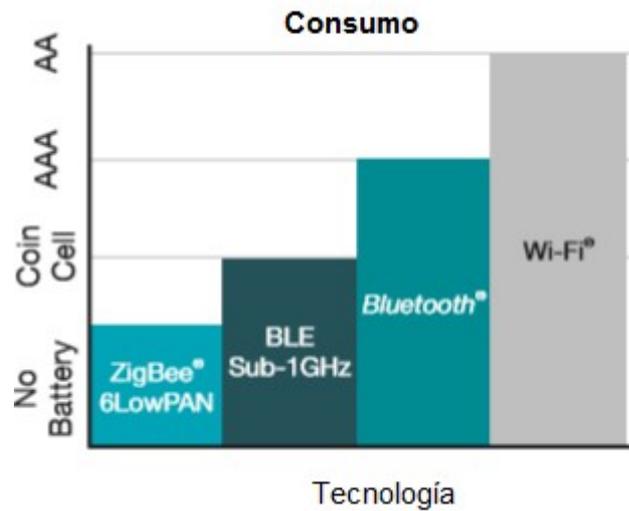


Figura 12: Gráfico del consumo de batería de las tecnologías inalámbricas

Se puede apreciar que el Wi-Fi es la tecnología que más consume, ya que necesita una pila AA que ofrece entre 1100 mah y 3000 mah. La siguiente tecnología que más consume es el Bluetooth, que necesita una pila AAA que ofrece entre 900 mah y 1155 mah. Las tecnologías Sub 1Ghz, ZigBee y 6LoWPAN no necesitan más que una pila de botón que ofrece entre 25 mah y 1000 mah, por lo que no habría mayores problemas en alimentarlas.

Por tanto, en función del consumo la tecnología que se descartaría sería el Wi-Fi (aunque una alimentación en base a pilas AA no supone un gran costo a corto plazo, a la larga sí puede suponerlo).

- Topología de red

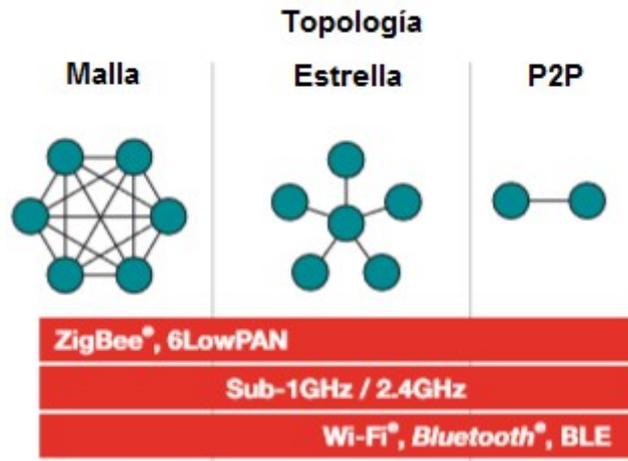


Figura 13: Gráfico de las topologías de las tecnologías inalámbricas

Se puede apreciar en éste gráfico que ZigBee y 6LoWPAN pueden adoptar una topología de red en malla, la cual nos es más interesante para la extensión de la Internet de las Cosas al hogar ya que permite que cada dispositivo inteligente se conecte con cada uno del resto de dispositivos, sin afectar, por ejemplo, que uno de ellos deje de funcionar.

Por tanto, después de analizar las diferentes tecnologías inalámbricas disponibles, las que más satisfacen el objetivo de este trabajo son ZigBee y 6LoWPAN, ambas pertenecientes al estándar 802.15.4.

5.9. Comparativa con tecnologías cableadas

Las tecnologías cableadas son también otra opción que puede considerarse a la hora de implementar la Internet de las Cosas al Hogar. Aunque ya se han visto las diferentes tecnologías inalámbricas que hay hoy en día en el mercado con sus respectivas ventajas e inconvenientes, se exponen a continuación las principales tecnologías cableadas de la actualidad, ofreciendo así un abanico de tecnologías más amplio de cara a futuras implementaciones.

5.9.1. Ethernet

El IEEE estableció el 802.3 *Working Group* al objeto de desarrollar, para tecnologías cableadas, una especificación de nivel físico y un protocolo MAC. Ethernet es un estándar de transmisión de datos para redes de área local.

Se distinguen diferentes variantes de tecnología Ethernet [29]:

Abreviatura	Nombre	Cable	Conector	Velocidad	Puertos
10Base2	Thin Ethernet	Cable coaxial de diámetro delgado	BNC	10 Mb/s	185 m
10Base5	Thick Ethernet	Cable coaxial de diámetro ancho	BNC	10 Mb/s	500 m
10Base-T	Ethernet estándar	Par trenzado	RJ-45	10 Mb/s	100 m
100Base-TX	Fast Ethernet	Doble par trenzado	RJ-45	100 Mb/s	100 m
100Base-FX	Fast Ethernet	Fibra óptica multimodo		100 Mb/s	2 km
1000Base-T	Ethernet Gigabit	Doble par trenzado	RJ-45	1000 Mb/s	100 m
1000Base-LX	Ethernet Gigabit	Fibra óptica monomodo o multimodo		1000 Mb/s	550 m
1000Base-SX	Ethernet Gigabit	Fibra óptica multimodo		1000 Mb/s	550 m
10GBase-SR	Ethernet de 10 Gigabits	Fibra óptica multimodo		10 Gbit/s	500 m
10GBase-LX4	Ethernet de 10 Gigabits	Fibra óptica multimodo		10 Gbit/s	500 m

Tabla 5: Tipos de IEEE 802.3 Ethernet

Ethernet es una tecnología muy usada, ya que su coste no es muy elevado. Sin embargo, como toda tecnología cableada, presenta ciertos inconvenientes frente a las tecnologías inalámbricas de cara al propósito que seguimos con el IoT en el hogar [30]:

- Coste superior al de tecnologías inalámbricas.
- Soporte limitado de movilidad.
- Dificultad para la evolución en instalaciones existentes y para la instalación en entornos protegidos.

5.9.2. PLC

La PLC (*Power Line Communications*) es una tecnología que utiliza la red eléctrica existente para transmitir información entre diferentes puntos [31][32].

En España se hicieron varios pilotos en diferentes pueblos y localidades, aunque finalmente, no terminó de cuajar debido al abaratamiento y mejora en prestaciones de las conexiones xDSL, quedando PLC como una tecnología de interconexión local y no de acceso a Internet.

PLC usa los cables eléctricos para transmitir datos, para lo cual lo primero que necesita es separar de algún modo la información digital de la señal eléctrica que sirve para alimentar nuestros electrodomésticos. Esto lo consigue de forma similar a cómo las líneas ADSL separan la señal de voz de la de datos, es decir, con un filtrado en frecuencia. Por una parte tenemos la corriente eléctrica que viaja a baja frecuencia (en España a 50 Hz) y a relativamente alto voltaje (220 voltios). Por otra, se tiene la señal de datos que se encuentra en una frecuencia superior (decenas de MHz) y con un voltaje muy inferior, que es separada mediante un filtro incluido en los adaptadores PLC.

Por tanto, para conectarse a Internet utilizando esta tecnología, es necesario el uso de un módem PLC en las dependencias del usuario y dispositivos de red, tales como repetidores y equipos terminales a lo largo de la red de transporte eléctrico, hasta el punto de interconexión de la red eléctrica con la red de datos.

Este esquema de red puede apreciarse en la siguiente imagen [33]:

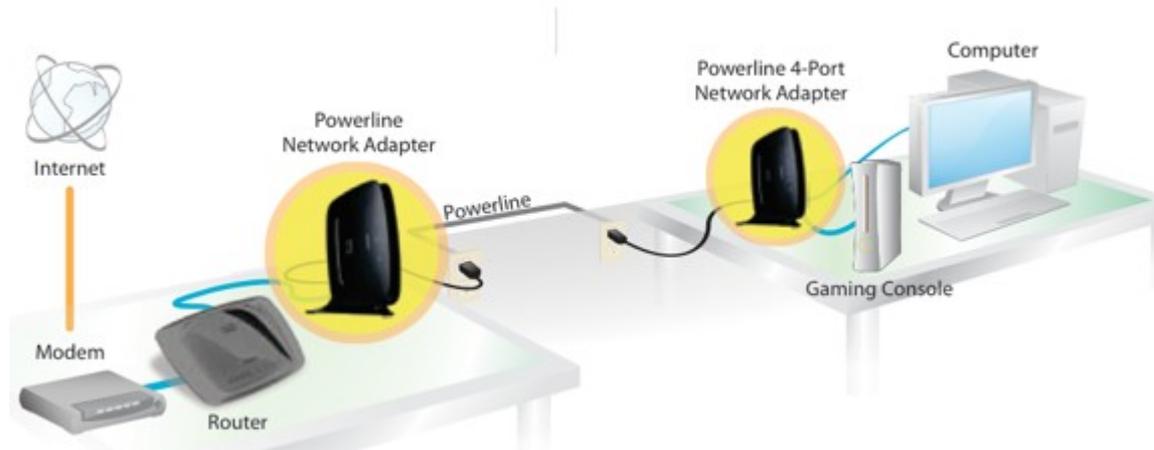


Figura 14: Ejemplo de conexión PLC

Los estándares asociados a la tecnología PLC fueron definidos por la *HomePlug Powerline Alliance* y por la *Universal Powerline Association*. El más habitual es *HomePlug* [33].

A continuación se presenta un esquema de cómo sería una instalación PLC en el hogar [34]:

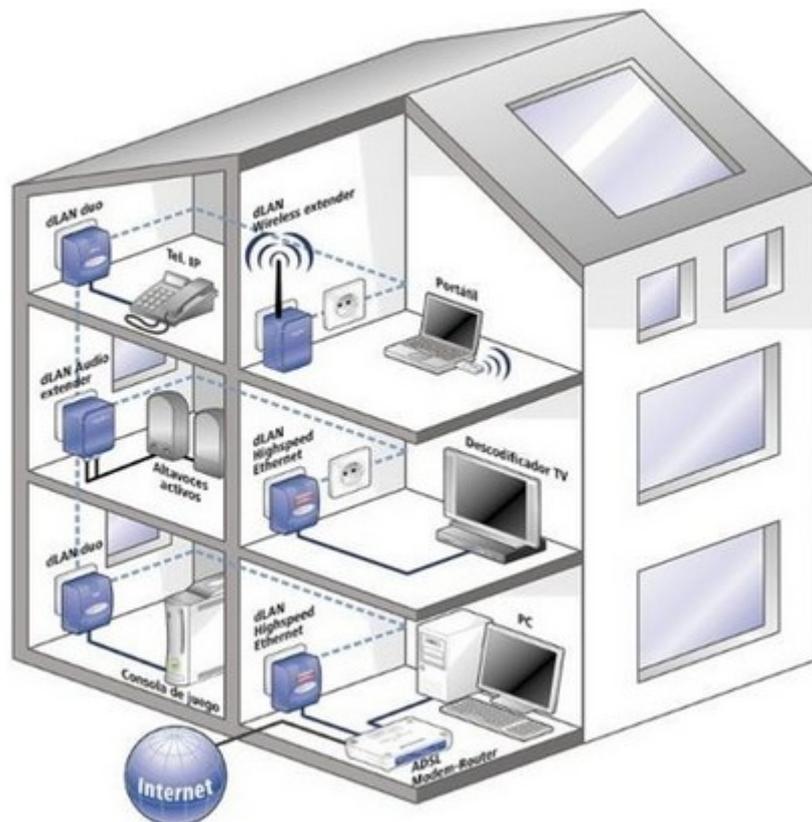


Figura 15: Instalación de PLC en el Hogar

5.9.3. KNX

La tecnología KNX es un sistema abierto para la automatización y el control de edificios y viviendas. KNX surgió de las exigencias de una mayor flexibilidad y comodidad en las instalaciones eléctricas, unidas a la búsqueda de reducir las necesidades de energía. KNX tiene una tecnología flexible y distintos medios de transmisión:

- Par Trenzado: Se trata de un bus de control mediante cableado independiente de uso exclusivo para la comunicación KNX.
- Red eléctrica: Se usa el cableado ya existente para la red de distribución eléctrica de 220 V.
- Radio Frecuencia: No se requiere ningún tipo de medio físico, ya que la comunicación se realiza mediante señales de radio frecuencia.
- Protocolo IP: Se utiliza Ethernet o Internet para comunicarse mediante mensajes IP.

Independientemente del sistema de transmisión elegido, cada componente de bus dispone de su propia inteligencia, por lo que no resulta necesaria una unidad central de control. Por lo tanto, KNX puede ser utilizado tanto para pequeñas instalaciones (viviendas) como en proyectos mucho más grandes (hoteles, edificios administrativos,...) [35] [36] [37].

6. ESTUDIO DE MERCADO DE LOS CHIP DE RADIO

En este punto se va a realizar un estudio del mercado actual de los chips que nos ofrecen los diferentes fabricantes para la posible implementación de la Internet de las Cosas a los dispositivos. Se ha hecho una clasificación según los fabricantes dentro de cada tecnología inalámbrica de las que se vieron en el apartado 5.

Además, se verán también algunas soluciones completas que están sacando algunas compañías como Movistar, Samsung o Google, así como otras soluciones de código libre, donde plataformas como Arduino y Raspberry Pi están adquiriendo bastante popularidad entre los usuarios.

Todos los precios que se proporcionan en este estudio han sido obtenidos de la tienda de distribución www.mouser.es o desde la tienda del propio fabricante.

6.1. Wi-Fi

En el ámbito de la tecnología Wi-Fi son muchas las opciones de SoC que hay en el mercado, ya que es una tecnología que está bastante asentada.

6.1.1. Atmel ATSAMW25

Atmel ofrece una familia de SoC de bajo consumo para dotar de conectividad Wi-Fi a cualquier sistema embebido. Esto abre las puertas de la Internet de las Cosas a la amplia gama de dispositivos y aplicaciones que requieren la integración de conectividad WLAN sin comprometer el precio y el consumo de batería.

Los SoC Wi-Fi de Atmel han sido optimizados para funcionar con baterías de entre 2.5V y 4.2V y un bajo consumo de 4 μ A para el modo de ahorro de energía. Esta optimización permite tener un perfil de bajo consumo de energía cuando un nodo del IoT tiene que estar enviando datos varias veces por día.

El SoC ATSAMW25 está basado en el núcleo WINC1500 de Atmel combinado con la última tecnología basada en el microcontrolador de Atmel ARM Cortex -M0+. Este sistema ofrece una solución integrada de software con aplicaciones y protocolos de seguridad tales como TLS y servicios de red integrados como pila de protocolos TCP/IP.



Figura 16: ATSAMW25

6.1.2. Atmel ATWILC1000

El SoC ATWILC1000 es un complemento ideal para soluciones MCU existentes que traen Wi-Fi a través de interfaces UART, SPI o SDIO. Este SoC proporciona un rendimiento de hasta 72 Mbps y cuenta con su propia administración de energía. Su fuente de reloj soporta frecuencias de entre 12 MHz y 32 MHz y está disponible en paquete QFN.

6.1.3. Atmel ATWILC3000

El SoC ATWILC3000 ofrece solución tanto Wi-Fi como Bluetooth. Está implementado en tecnología CMOS de 65 nm, y ofrece un consumo de energía muy bajo a la vez que proporciona un alto rendimiento. Su frecuencia de reloj soporta frecuencias entre 14 MHz y 40 MHz, y 32.768 KHz para el modo reposo.

6.1.4. Atmel ATWINC1500

El SoC ATWILC1000 es un complemento ideal para soluciones MCU existentes que traen Wi-Fi a través de interfaces UART y SPI. Este SoC proporciona un rendimiento de hasta 72 Mbps y cuenta con su propia administración de energía. Su fuente de reloj soporta frecuencias de entre 12 MHz y 32 MHz. El SoC ATWILC1500 está disponible en un paquete QFN.



Figura 17:
ATWINC1500

6.1.5. Atmel ATWINC3400

El SoC WINC3400 combina soluciones de red tanto de Wi-Fi como de Bluetooth *Low Energy*. Es un complemento ideal para soluciones MCU existentes tanto a través de interfaz UART como SPI-a. El SoC WINC3400 conecta cualquier AVR Atmel o *Smart* MCU con los requisitos mínimos de recursos. También cuenta con un microcontrolador en el chip y memoria flash integrada para la correcta convivencia de las funcionalidades Wi-Fi y BLE. La frecuencia de reloj necesaria puede ser entre 12 MHz y 32 Mhz.



Figura 18:
ATWINC3400

6.1.6. Tabla comparativa de productos Atmel para Wi-Fi

A continuación se ofrece una tabla comparativa de los productos expuestos para las soluciones Wi-Fi de Atmel con sus principales características en común.

	ATSAMW25	ATWILC1000	ATWILC3000	ATWINC1500	ATWINC3400
Estándar IEEE	802.11 b/g/n	802.11 b/g/n	802.11 b/g/n	802.11 b/g/n	802.11 b/g/n
Soporte de Seguridad	WEP, WPA, TLS	WEP, WPA2	WEP, WPA, WPA2	WPA, WPA2, TLS, SSL	SSL
Servicios de red	TCP/IP, DHCP, DNS	No	No	TCP/IP (IPv4), DHCP, DNS, UDP, HTTP, HTTPs	TCP, UDP, DHCP, ARP, HTTP, DNS
Gestión de memoria	Si	Si	Si	No	No
N.º de pines	51	40	48	40	48
Voltaje de funcionamiento	2.7 – 3.6	2.5 – 4.2	2.5 – 4.2	3.0 – 4.2	2.5 – 4.2
Banda de frecuencia	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Velocidad de transmisión (Mb/s)	72	72	72	72	72
Precio	18.86 €	10.48 €	13.96 €	11.91 €	14.04 €

Tabla 6: Tabla comparativa de productos Atmel para Wi-Fi

6.1.7. Texas Instruments CC3200

Los SoC de Texas Instruments ofrecen soluciones para las necesidades de diseño orientados al rendimiento de bajo consumo de energía, además de soluciones para aplicaciones Wi-Fi integradas. Estas soluciones están diseñadas para poder tener un funcionamiento de más de un año de duración con una alimentación de solo dos pilas AA.

A continuación se muestran los SoC que incorporan un procesador ARM Cortex-M4 integrado. Texas Instruments ofrece también otros SoC en su página web que funcionan con un MCU externo, que no se analizan aquí para no encarecer la solución final, ya que necesitaríamos mínimo un componente más, el MCU externo.

Creado específicamente para la Internet de las Cosas, el CC3200 es un MCU inalámbrico que integra un ARM Cortex-M4 de alto rendimiento, permitiendo diseñar una aplicación completa con un solo circuito integrado. El SoC CC3200 es una plataforma completa, incluyendo software, aplicaciones de ejemplo, herramientas, guías de usuario y de programación, diseños de referencia y una comunidad de soporte TI E2E

(<https://e2e.ti.com>). Todo esto permite que se pueda realizar un desarrollo más o menos rápido sin necesidad de tener una experiencia previa con dispositivos Wi-Fi. El SoC CC3200 está disponible en formato de paquete QFN.

El núcleo ARM Cortex-M4 que incorpora el CC3200 funciona a 80 MHz. El dispositivo puede incluir una amplia variedad de periféricos, ya que cuenta con interfaces I2S, SD/MMC, UART, SPI, I2C y ADC de cuatro canales. El CC3200 incluye una RAM flexible para código y datos y una ROM con el gestor de arranque flash de serie y de los controladores de periféricos.



Figura 19: CC3200

El subsistema de administración de energía incluye convertidores DC-DC integrados que soportan una amplia gama de tensiones de alimentación. Este subsistema de administración permite al dispositivo tener modos de consumo de baja potencia (reposo), como el de hibernación con el modo RTC que requiere menos de 4µA de corriente.

6.1.8. Texas Instruments CC3200MOD

El CC3200MOD es muy similar al CC3200 que se acaba de ver más arriba, con la diferencia de que incluye todos los componentes de hardware requeridos a nivel de sistema, como son los relojes, flash SPI, conmutador de radiofrecuencia, y un paquete LGA para un montaje y diseño de PCB fácil y de bajo costo. En el modo de hibernación consume 7µA de corriente.

6.1.9. Tabla comparativa productos Texas Instruments para Wi-Fi

	CC3200	CC3200MOD
Estándar IEEE	802.11 b/g/n	802.11 b/g/n
Soporte de Seguridad	WPA2, WPS 2.0, 256-bit encryption, TLS/SSL	WPA2,WPS 2.0, 256-bit encryption, TLS/SSL
Servicios de red	Estación Wi-Fi, Punto de Acceso Wi-Fi, modo Wi-Fi Direct,TCP/IP, servidor HTTP	Estación Wi-Fi, Punto de Acceso Wi-Fi, modo Wi-Fi Direct,TCP/IP, servidor HTTP
Gestión de memoria	Si	Si
Voltaje de funcionamiento	1.85 – 3.6	2.3 – 3.6
Banda de frecuencia	2.4 GHz	2.4 GHz
Velocidad de transmisión (Mb/s)	16 (UDP) 13 (TCP)	16 (UDP) 13 (TCP)
Precio	16.36 €	22.68 €

Tabla 7: Tabla comparativa productos Texas Instruments para Wi-Fi

6.1.10. Digi Xbee Wi-Fi

Digi International es una empresa que está muy bien ubicada en el mercado actual del IoT, centrada principalmente en dispositivos Wi-Fi y Bluetooth y con un funcionamiento basado principalmente en la nube, es decir, están muy bien posicionados en el sector *cloud* como una PaaS (Plataforma como servicio), por lo que no es una solución que se busca en este estudio, pero se va a presentar un chip interesante que presentan dentro de la conexión Wi-Fi de cara a una posible línea de trabajo futura que pueda interesarle al lector.

El módulo Xbee Wi-Fi permite crear productos en la nube conectados a Wi-Fi de manera más rápida y eficiente que nunca, ya que incorpora al dispositivo la plataforma Xbee de la nube de Digi.

El desarrollo de un producto conectado a la nube requiere un cierto grado de experiencia, tanto en el desarrollo de hardware como software, y esto puede ser para las empresas costoso y consumir mucho tiempo. El módulo Xbee Wi-Fi ayuda a superar dichos obstáculos, ya que el módulo puede ser integrado en un diseño con el mínimo esfuerzo y coste aprovechando el “*Wi-Fi Cloud Kit*” de Xbee de Digi.

El módulo Xbee Wi-Fi soporta los estándares IEEE 802.11 b/g/n con una velocidad de transmisión de hasta 72 Mbps en la banda ISM de 2.4 GHz. Incorpora seguridad mediante WPA, WPA2 y WEP y requiere un rango de alimentación de entre 3.14V y 3.46V de corriente continua.



Figura 20: Xbee Wi-Fi

6.2. Bluetooth

Aunque al final del punto 5.8 se llegó a la conclusión de que la tecnología Bluetooth no satisfacía los objetivos de este estudio, al ser una tecnología muy arraigada actualmente en el mercado, se ha decidido añadir unos cuantos componentes interesantes, para que el lector tenga una visión más completa del estado actual del mercado.

6.2.1. Texas Instruments CC2640

El SoC CC2640 es un MCU inalámbrico focalizado en aplicaciones de Bluetooth *Smart* o Bluetooth *Low Energy*. El CC2640 pertenece a la familia CC26xx, que son dispositivos MCU de consumo muy bajo que trabajan en la banda ISM de 2.4 GHz y ofrece un funcionamiento que permite una larga duración de la batería o incluso el funcionamiento con pilas de botón.

El CC2640 contiene un procesador ARM Cortex.M3 de 32 bits que funciona a 48 MHz como procesador principal y un rico conjunto de periféricos, incluyendo un sensor controlador de potencia ultra-baja, ideal para interconectar sensores externos y/o recoger datos analógicos y digitales automáticamente mientras el resto del sistema se encuentra en modo reposo.



Figura 21: CC2640

El controlador Bluetooth *Low Energy* está incrustado en la ROM y se ejecuta aparte en un procesador ARM Cortex-M0. Esta arquitectura mejora el rendimiento general del sistema y el consumo de energía, y libera espacio en la memoria flash para la aplicación.

6.2.2. Texas Instruments CC2541

El SoC CC2541 es una solución con optimización de energía para Bluetooth *Low Energy* y aplicaciones propietarias de 2.4 GHz. El CC2541 permite construir una red de nodos robusta a bajo coste. Combina un excelente rendimiento de un transceptor de radiofrecuencia con un



Figura 22: CC2541

estándar mejorado MCU 8051, en un sistema programable con memoria flash con 8Kb de memoria RAM. El CC2541 es muy adecuado para los sistemas donde se requiere un consumo de energía muy bajo, ya que cuenta con diversos modos de funcionamiento con

tiempos de transición cortos entre dichos modos, lo cual permite un consumo de energía más bajo.

El CC2541 es compatible con el SoC de Texas Instruments CC2533 del estándar IEEE 802.15.4. El CC2541 tiene dos versiones diferentes: CC2541F128 / F256, con 128 KB y 256 KB de memoria flash, respectivamente.

6.2.3. Texas Instruments CC2540

El CC2540 es un SoC rentable y de bajo consumo para aplicaciones de Bluetooth *Low Energy*. Permite la construcción de nodos “Maestro” y “Esclavo” de una red BLE con muy bajo costo. El resto de características que presenta este SoC son muy similares al CC2541 visto más arriba. Hay dos versiones diferentes de CC2540, CC2540F128 y CC2540F256, con 128 y 256 Kb de memoria flash, respectivamente.

6.2.4. Texas Instruments CC2540T

El SoC CC2540T es un microcontrolador (MCU) para aplicaciones de baja energía, bajo consumo y rentables. Permite la creación de nodos “Maestro” y “Esclavo” al igual que el CC2540 y puede operar hasta una temperatura 125°C. El resto de prestaciones es similar al SoC CC2540.

6.2.5. Tabla comparativa de productos Texas Instruments para Bluetooth

	CC2640	CC2540	CC2541	CC2540T
Estándar IEEE	802.15.1	802.15.1	802.15.1	802.15.1
Soporte de Seguridad	AES-128	AES-128	AES	AES
Servicios de red	No	No	No	No
Gestión de memoria	Si	Si	Si	Si
N.º de pines	Hasta 31	21	23	21
Voltaje de funcionamiento	1.7 – 3.8	2 – 3.6	2 – 3.6	2– 3.6
Banda de frecuencia	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Velocidad de transmisión (Mb/s)	2	2	2	2
Precio	5.38 €	4.91 €	4.79 €	6.24 €

Tabla 8: Tabla comparativa de productos Texas Instruments para Bluetooth

6.2.6. Bluegiga BLE112

Bluegiga es una compañía Silicon Labs que ofrece soluciones completas e inalámbricas proporcionando a los clientes las ventajas de un alto rendimiento, ahorro de energía, conectividad y simplicidad en el diseño.

El BLE112 es un módulo Bluetooth Smart, orientado para sensores de bajo consumo. Integra todas las funciones necesarias para una aplicación de Bluetooth Smart, incluyendo Bluetooth radio y pila de software. El BLE112 puede albergar también aplicaciones de usuario finales, lo que significa que no requiere un MCU externo. Las interfaces de hardware para conectar diferentes sensores y periféricos pueden alimentarse con un pila de botón estándar de 3V o un par de pilas AAA.



Figura 23: BLE112

En el modo de hibernación o reposo consume 500nA, siendo capaz de pasar al modo activo en cuestión de unos pocos microsegundos.

6.2.7. Bluegiga BLE113

El BLE113 es un módulo BLE112 mejorado, ya que presenta las mismas prestaciones en cuanto a Bluetooth *Smart* que el BLE112, pero el BLE113 consume aproximadamente un 30% menos de energía que el BLE112 y es más pequeño que éste.

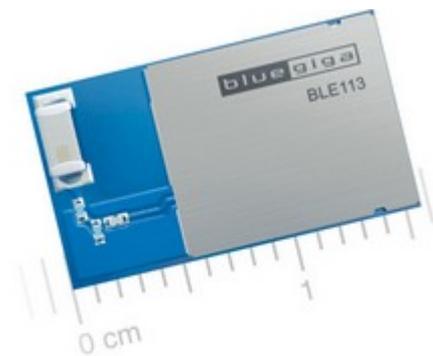


Figura 24: BLE113

6.2.8. Bluegiga BT121

El BT121 es un módulo Bluetooth *Smart* orientado para aplicaciones que requieren tanto Bluetooth *Smart* como el Bluetooth Clásico. Por tanto, pueden conectarse al BT121 dispositivos que solo soportan perfiles Bluetooth SPP o Apple IAP2 como dispositivos compatibles con Bluetooth *Smart*. El BT121 integra un Bluetooth radio de alto rendimiento, un MCU de baja potencia ARM Cortex y la pila de software 2Bluegiga Bluetooth *Smart Ready*”, convirtiéndolo en un dispositivo fácil de usar al no necesitar radiofrecuencia o

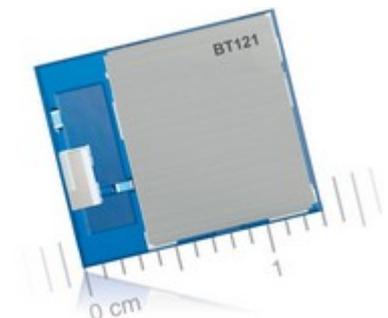


Figura 25: BT121

desarrollo de software de Bluetooth.

El BT121 puede utilizarse como un módem junto a un MCU independiente que actúe como *host*, pero las aplicaciones también pueden ser embebidas en el ARM Cortex incorporado mediante el lenguaje de Bluegiga BGScript™ basado en scripts.

6.2.9. Tabla comparativa de productos Bluegiga para Bluetooth

	BLE112	BLE113	BT121
Estándar IEEE	802.15.1	802.15.1	802.15.1
Soporte de Seguridad	Mediante un mánager de seguridad de Bluegiga	Mediante un mánager de seguridad de Bluegiga	No
Servicios de red	No	No	No
Gestión de memoria	Si	Si	Si
Interfaces externas	UART, USB, SPI, I2C, PWM, GPIO	UART, SPI, I2C, PWM, GPIO	UART, SPI, I2C, GPIO
Voltaje de funcionamiento	2 – 3.6	2 – 3.6	2.2 – 3.6
Banda de frecuencia	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Velocidad de transmisión (Kb/s)	100+	100+	1000(SPP) 200(iAP2) 100(BLE)
Precio	10.76 €	10.44 €	18.29 €

Tabla 9: Tabla comparativa de productos Bluegiga para Bluetooth

6.3. ZigBee

ZigBee, actualmente, es el estándar más demandado en el ámbito de la domótica y de las redes de sensores inalámbricos que se estudiaron con anterioridad, por lo tanto hay una amplia variedad de productos en el mercado que funcionan con esta tecnología. Es por esta gran demanda y por su bajo coste y tamaño, que es difícil encontrar fabricantes y distribuidores que ofrezcan la venta de un solo chip, por lo que hay que comprar estos componentes al por mayor en la mayoría de los casos.

6.3.1. Atmel ATSAMR21E16A

Las soluciones SoC que ofrece Atmel son ideales para aplicaciones que requieren un espacio de placa reducido y un bajo costo sin comprometer el MCU, la radiofrecuencia y el rendimiento. Atmel ofrece dos familias de SoC, las que funcionan con un ARM Cortex-M0+ de 32 bit o las basadas en un AVR de 8 bit.

El SoC ATSAMR21E16A combina un ARM Cortex-M0+ de 32 bits y un transceptor de 2.4 Ghz. Ofrece un alto rendimiento de radiofrecuencia con un enlace de 103 dBm. El dispositivo cuenta con un aceleradores de hardware y modos de transmisión automática, doce canales de acceso directo a la memoria del controlador (DMA) y hasta cuatro módulos configurables para interfaces I2C, SPI y UART, y cuenta con un motor de cifrado AES-128. El ATSAMR2E16A cuenta también con un PTC y un *Full-Speed* USB.



Figura 26:
ATSAMR21E16A

Para complementar el SoC ATSAMR21E16A, es compatible con amplificadores de potencia externos y con diversidad de antenas.

El ATSAMR21GE16A tiene 16 pines de entrada/salida, mientras que el ATSAMR21G16A tiene 28 pines de entrada/salida.

6.3.2. Atmel ATSAMR21E17A

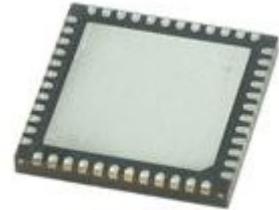
Este SoC tiene las mismas prestaciones que el ATSAMR21E16A, pero aumenta su memoria flash de 64 Kbytes a 128 Kbytes y su memoria RAM de 8 Kbytes a 16 Kbytes. Al igual que con el SoC anterior, Atmel ofrece dos chips iguales en prestaciones pero con un número diferente de pines de entrada/salida.

6.3.3. Atmel ATSAMR21E18A

Este SoC tiene las mismas prestaciones que el ATSAMR21E16A, pero aumenta su memoria flash de 128 Kbytes a 256 Kbytes y su memoria RAM de 16 Kbytes a 32 Kbytes. Al igual que con el SoC anterior, Atmel ofrece dos chips iguales en prestaciones pero con un número diferente de pines de entrada/salida.

6.3.4. Atmel ATmega256RFR2

El SoC ATmega256RFR2 combina un AVR de 8 bits con un transceptor de radiofrecuencia de 2.4 Ghz. Ofrece un alto rendimiento de radiofrecuencia con un enlace de 103.5 dBm. El dispositivo cuenta con un hardware de filtrado de direcciones PAN múltiple (MAF), la mejora de máscaras de canal CH25 y CH26 permitiendo que el dispositivo funcione a plena potencia (1W) en dichos canales usando amplificadores de potencia externos.



*Figura 27:
ATmega256RFR2*

6.3.5. Atmel ATmega128RFR2

El SoC ATmega128RFR2 ofrece las mismas prestaciones que el SoC ATmega256RFR2, con la diferencia de que en lugar de tener 256 Kbytes de memoria Flash, tiene 128 Kbytes.

6.3.6. Atmel ATmega64RFR2

El SoC ATmega64RFR2 ofrece las mismas prestaciones que el SoC ATmega128RFR2, pero en lugar de tener 128Kbytes de memoria Flash, tiene 64 Kbytes.

6.3.7. Tabla comparativa de productos Atmel para ZigBee

32 bits			
SoC	ATSAMR21E16A	ATSAMR21E17A	ATSAMR21E18A
Estándar IEEE	802.15.4	802.15.4	802.15.4
Soporte de Seguridad	AES	AES	AES
Memoria Flash (Kbytes)	64	128	256
Memoria RAM (Kbytes)	8	16	32
N.º de pines	16 o 28	16 o 28	16 o 28
Voltaje de funcionamiento	1.8 – 3.6	1.8 – 3.6	1.8 – 3.6
Banda de frecuencia	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Velocidad de transmisión (Kb/s)	250	250	250
Precio	6.18 €	3.91 € (2450 unidades)	6.69 €
8 bits			
SoC	ATmega256RFR2	ATmega128RFR2	ATmega64RFR2
Estándar IEEE	802.15.4	802.15.4	802.15.4
Soporte de Seguridad	AES	AES	AES
Memoria Flash (Kbytes)	256	128	64
Memoria RAM (Kbytes)	32	16	8
N.º de pines	38	38	38
Voltaje de funcionamiento	1.8 – 3.6	1.8 – 3.6	1.8 – 3.6
Banda de frecuencia	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Velocidad de transmisión (Mb/s)	2	2	2
Precio	7.55 €	7.20 €	6.86 €

Tabla 10: Tabla comparativa de productos Atmel para ZigBee

6.3.8. Texas Instruments CC2530

El SoC CC2530 es una solución para IEEE 802.15.4, ZigBee y aplicaciones RF4CE. Permite crear nodos de red robustos con coste muy bajo. El CC2530 combina un transceptor de radiofrecuencia de 2.4 Ghz con un mejorado MCU 8051, una memoria flash estándar programable y 8Kb de RAM entre otras características.



Figura 28: CC2530

El CC2530 tiene cuatro versiones diferentes, CC2530F32/64/128/256, con 32/64/128/256 Kb de memoria flash respectivamente. El CC2530 tiene varios modos de operación, por lo que es muy adecuado para los sistemas donde se requiere un consumo de energía bajo. También tiene tiempos de transición cortos entre los distintos modos de funcionamiento que garantizan dicho consumo de energía bajo.

6.3.9. Texas Instruments CC2531

El SoC CC2531 es una solución para IEEE 802.15.4, ZigBee y aplicaciones RF4CE con USB habilitado. Permite la creación de nodos de red mediante USB con bajo coste. El CC2531 combina el rendimiento de un transceptor radiofrecuencia con una mejorada MCU8051, memoria flash estándar programable, 8Kb de RAM y otras características de largo alcance.



Figura 29: CC2531

El CC2531 tiene varios modos de operación, por lo que es adecuado para sistemas donde se requiere un consumo de energía bajo. Los tiempos de transición cortos entre modos de funcionamiento garantiza un consumo de energía bajo.

El código fuente de las bibliotecas y ejemplos HID USB y CDC, se pueden descargar desde la página del producto.

6.3.10. Texas Instruments CC2538

El SoC CC2538 es el microcontrolador inalámbrico ideal para aplicaciones ZigBee de alto rendimiento. El dispositivo combina un sistema MCU basado en ARM Cortex-M3 de gran alcance con un máximo de 32Kb de RAM en el chip y hasta 512Kb de memoria flash, con una robusta interfaz de radio IEEE 802.15.4.



Figura 30: CC2538

Esto permite al dispositivo manejar redes complejas con seguridad, aplicaciones exigentes y descargas OTA. Treinta y dos GPIOs y periféricos de serie permiten conexiones simples con el resto de la placa. Los potentes aceleradores de seguridad permiten una autenticación y cifrado rápido y eficiente, dejando libre a la CPU para manejar tareas de la aplicación.

Los múltiples modos de bajo consumo con retención permiten un arranque rápido desde el reposo y se requiere una energía mínima para realizar tareas periódicas. Para un desarrollo sin problemas, el CC2538 incluye un sistema de depuración de gran alcance y una biblioteca de controlador integral.

6.3.11. Tabla comparativa de productos Texas Instruments para ZigBee

	CC2530	CC2531	CC2538
Estándar IEEE	802.15.4	802.15.4	802.15.4
Soporte de Seguridad	AES	AES	AES-128/256, SHA2, ECC.128/256, RSA
Servicios de red	No	No	No
Gestión de memoria	Si	Si	Si
Interfaces externas	UART, DMA,GPIO	UART, DMA, USB, GPIO	UART, USB, SPI, I2C, GPIO,µDMA
Voltaje de funcionamiento	2 – 3.6	2 – 3.6	2 – 3.6
Banda de frecuencia	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Precio	7.24 €	8.88 €	10.59 €

Tabla 11: Tabla comparativa de productos Texas Instruments para ZigBee

6.3.12. Digi Xbee ZigBee

Los módulos XBee ZigBee ofrecen conectividad inalámbrica rentable para dispositivos electrónicos. Dichos dispositivos son interoperables con otros conjuntos de dispositivos con características ZigBee, incluidos los dispositivos de otros fabricantes.

Los módulos XBee ZigBee son ideales para las aplicaciones donde la energía y los controles de su eficiencia son críticos. La interfaz SPI proporciona una interfaz de alta velocidad y optimiza la integración de microcontroladores embebidos, reduciendo costes de desarrollo y tiempo de comercialización. Características como la unión y multidifusión también permiten la integración sencilla de un dispositivo de automatización al hogar.



Figura 31: Xbee ZigBee

Como todos los productos de la familia XBee, el módulo XBee ZigBee no requiere de ninguna configuración o desarrollo adicional. Al poder realizarse la programación directamente en el módulo se elimina la necesidad de un procesador por separado. Debido a que el software inalámbrico está aislado, las aplicaciones pueden ser desarrolladas sin riesgo para el rendimiento de radiofrecuencia o de la seguridad.

6.4. 6LoWPAN

Al ser 6LoWPAN la tecnología más reciente en el ámbito del IoT, no hay actualmente muchas opciones de mercado. Sin embargo, poco a poco los fabricantes van lanzando sus propias soluciones 6LoWPAN, por lo que se prevé que esta parte del mercado siga expandiéndose.

6.4.1. Texas Instruments CC2630

En fechas recientes, Texas Instruments lanzó al mercado un par de SoC que aseguraban ser específicamente para 6LoWPAN y que se verán a continuación. Sin embargo, al ser 6LoWPAN miembro de la familia del estándar IEEE 802.15.4 al igual que ZigBee, como ya se vio en los puntos 5.5 y 5.6, las soluciones mostradas anteriormente para la tecnología ZigBee también pueden ser utilizadas para 6LoWPAN, como por ejemplo sucede con el SoC CC2538 visto en el punto 6.3.10.

El SoC CC2630 es un microcontrolador inalámbrico focalizado en aplicaciones ZigBee y 6LoWPAN.

El dispositivo es un miembro de la familia CC26xx, que son dispositivos rentables de bajo consumo y radiofrecuencia de 2.4 GHz. El modo de bajo consumo de energía “activo” proporciona una excelente duración de la batería y permite operar a pequeñas aplicaciones de recolección de energía.



Figura 32: CC2630

El CC2630 contiene un procesador ARM Cortex-M3 de 32 bits funcionando a 48MHz como procesador principal y un rico conjunto de periféricos, incluyendo un controlador de baja potencia, ideal para interconectar sensores analógicos/digitales externos para recoger datos de forma autónoma mientras el resto del sistema está en modo suspensión. Esto hace al CC2630 ideal para redes ZigBee y 6LoWPAN.

El IEEE 802.15.4 MAC está embebido en la ROM y funciona en un procesador ARM Cortex-M0. Esta arquitectura mejora el rendimiento general del sistema y el consumo de energía, y libera memoria flash para la aplicación.

6.4.2. Texas Instruments CC2650

El SoC CC2650 es un microcontrolador inalámbrico orientado a aplicaciones Bluetooth Smart, ZigBee, 6LoWPAN y control remoto ZigBee RF4CE. El dispositivo es un miembro de la familia CC26xx, de baja energía y radiofrecuencia de 2.4 GHz. El modo de bajo consumo de energía proporciona una excelente duración de la batería.



Figura 33: CC2650

El CC2650 contiene un procesador ARM Cortex-M3 de 32 bits funcionando a 48 MHz como el procesador principal y un rico conjunto de periféricos, incluyendo un controlador ideal para interconectar sensores externos (analógicos y/o digitales) que recojan datos de forma autónoma mientras el resto del sistema está en modo suspensión. Esto hace al CC2650 ideal para aplicaciones dentro de una amplia gama de productos para ámbitos como la electrónica de bajo consumo, el médico y el industrial. El controlador Bluetooth LE y el IEEE 802.15.4 MAC se incrustan en la ROM y están parcialmente en ejecución en un procesador separado ARM Cortex-M0. Esta arquitectura mejora el rendimiento general del sistema y el consumo de energía y libera memoria flash para la aplicación.

6.4.3. Tabla comparativa de productos Texas Instruments para 6LoWPAN

	CC2630	CC2650
Estándar IEEE	802.15.4	802.15.4 y 802.15.1
Soporte de Seguridad	AES-128	AES-128
Servicios de red	6LoWPAN, IPv6	6LoWPAN, IPv6
Gestión de memoria	Si	Si
Voltaje de funcionamiento	1.7 – 3.8	1.7 – 3.8
Banda de frecuencia	2.4 GHz	2.4 GHz
N.º de pines(GPIOs)	10,15 o 31	10,15 o 31
Precio	6.34 €	7.10 €

Tabla 12: Tabla comparativa de productos Texas Instruments para 6LoWPAN

6.5. Otras opciones

Existen hoy en día muchas otras alternativas de las vistas anteriormente, gracias al auge del “código libre” y de las comunidades de usuarios, que pueden ser opciones muy interesantes para la Internet de las Cosas de cara a ser el centro de las redes de sensores o recolección de datos.

Debido a esta diversidad, y al cada vez más bajo coste con el que se puede adquirir microcontroladores, hay multitud de plataformas que ofrecen distintas placas completas y de reducido tamaño a un precio muy asequible (en torno a 25 o 30 €), donde la única limitación es la propia imaginación.

A continuación se exponen las placas más comunes y sus respectivas prestaciones.

6.5.1. Arduino

La idea de Arduino nació en el norte de Italia en el año 2005, en el Instituto para el Diseño e Iteración de Ivrea, con el objetivo de tener una placa donde los estudiantes pudiesen aprender y desarrollar sus propios proyectos. El equipo de Arduino dio más importancia a la simplicidad que al rendimiento del código y decidieron trabajar bajo licencia de software libre, lo que hizo que la placa la pudiese utilizar la gente para ampliar la plataforma y ajustarla a sus necesidades, y compartir luego sus proyectos en Internet.



Figura 34: Arduino Uno

En la actualidad existen muchos tipos de placa Arduino, siendo la placa “estándar” el Arduino Uno. La versión Arduino Uno cuenta con un microcontrolador ATmega328 y un puerto USB para conectarla a un ordenador. Dispone de 32 Kb de almacenamiento y 2 Kb de RAM, por lo que solo puede tener un código guardado.

Arduino Uno cuenta también con 14 pines GPIO de los cuales 6 pueden proporcionar una salida PWN) y 6 pines ADC con una resolución de 10-bit.

Su precio ronda los 20 €.

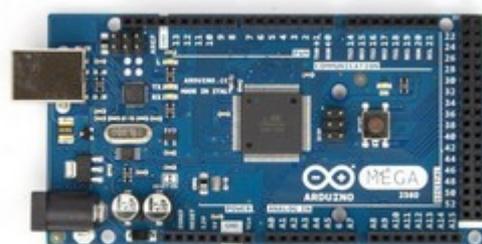


Figura 35: Arduino Mega

Otra versión de Arduino muy extendida para quienes el Arduino Uno se le quede corto y necesite más espacio es el

Arduino Mega 2560, con un microcontrolador Atmega más potente y con el mismo entorno de software. El Arduino Mega 2560 dispone de 256 Kb de memoria flash, 8 Kb de memoria RAM, tres puertos serie adicionales, 54 pines GPIO (14 compatibles con PWN) y 16 ADC [3].

Su precio ronda los 35 €.

6.5.2. Raspberry Pi

En 2006, Eben Upton, cofundador de la Fundación Raspberry Pi, construyó un ordenador barato y pequeño especialmente diseñado para programar y hacer pruebas. La Fundación puso en marcha esta idea con la colaboración de un grupo de profesores, programadores y expertos en hardware.



Figura 36: Raspberry Pi

Raspberry Pi es un ordenador que puede ejecutar un sistema operativo real y moderno para comunicarse con un teclado y con un ratón, hablar con Internet y conectarse a un monitor donde mostrar gráficamente los datos que está procesando. Esto convierte a la Raspberry Pi en una opción muy interesante como centro neurológico de la red de IoT que tengamos en el hogar [3].

Su precio ronda los 25 €.

6.5.3. BeagleBone

BeagleBone es una familia de placas del grupo Beagle Board, formado por trabajadores de Texas Instruments. Aunque los productos de Beagle Board no son parte de Texas Instruments, sí utilizan muchos componentes con el beneplácito de la compañía.

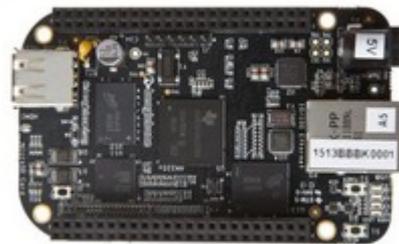


Figura 37: BeagleBone

La placa más pequeña y barata que han desarrollado los miembros de Beagle Board es la “BeagleBone Black”, en la cual se aprecia un cierto parecido a la dominante Raspberry Pi, con la que comparte ciertas características.

La placa BeagleBone Black cuenta con 65 pines GPIO distribuidos en dos filas de

conectores hembra, de los cuales ocho tienen salida PWM. También tiene pines ADC para entrada analógica [3].

Su precio ronda los 35 €.

6.5.4. MinnowBoard

Las placas MinnowBoard son las placas creadas por Intel para entrar en el mercado “*maker*” de los “Mini PC” donde ya se ha visto que domina Raspberry Pi. Actualmente se puede encontrar la segunda generación de esta placa, la denominada MinnowBoard Max, que cuenta con un procesador Intel Atom E3815 de 64 bits a 1.46 GHz, con 1 Gb de memoria RAM.

El proyecto MinnowBoard se encuentra dentro del open source, y los ficheros de sus diseños hardware se encuentran bajo licencia *Creative Commons*.

La MinnowBoard Max cuenta con una ranura micro SD, un puerto SATA2 de 3Gbps, puertos USB 2.0 y 3.0 y HDMI, un puerto Gigabit Ethernet, un puerto serie donde se puede conectar componente via FTDI y ocho pines GPIO.

Sin embargo, su precio hace que, frente a las placas que se han visto anteriormente, la MinnowBoard Max sea una opción menos válida y asequible. Se puede encontrar modelos de MinnowBoard Max en torno a 90 y 120 €.



Figura 38: MinnowBoard

6.5.5. Windows 10 IoT

El 29 de julio de 2015, Microsoft lanzó al mercado la última versión de su Sistema Operativo, el Windows 10. Microsoft anunció que su intención para esta nueva versión era crear un sistema operativo para toda una familia de dispositivos diferentes, de forma que Windows 10 fuese el nexo de unión de todos ellos. Así, semanas después del lanzamiento de la versión convencional, vio la luz el Windows 10 IoT. El Windows 10 IoT es una versión bastante más simplificada del SO principal, pero permite tener un SO como Windows 10 en dispositivos como Raspberry Pi o MinnowBoard, vistos anteriormente. También hay disponible una versión del Windows 10 IoT Virtual para poder correr este SO en placas Arduino, donde ya se vio que la capacidad de almacenamiento

era mucho más reducida [38].

De esta forma, desde la página web oficial de Microsoft podemos descargar la versión de Windows 10 IoT para la placa de la que se disponga. Sin embargo, para comenzar el desarrollo de aplicaciones en una de estas plataformas, hará falta un equipo con Windows 10 y tener instalado el Visual Studio 2015 [39].

6.5.6. Google Brillo

Con las expectativas que genera la Internet de las Cosas y la amplia cuota de mercado que se prevé que tenga, era de esperar que un gigante como Google no se iba a quedar atrás. Por eso, en la conferencia Google I/O [40] celebrada en mayo de 2015 presentó su Sistema Operativo para la Internet de las Cosas, Google Brillo [41]. Brillo soporta Wi-Fi y BLE, y está basado en Android, pero ha sido optimizado para funcionar con unos requisitos mínimos muy bajos y así poder estar destinado a casi cualquier dispositivo conectado. De hecho, Brillo solo mantiene las capas más bajas de Android.

Además de Brillo, Google también anunció en la Google I/O su solución para la capa de comunicaciones, *Weave*. Aunque *Weave* ha sido diseñado sobre Brillo, lo han hecho multiplataforma, de modo que puede funcionar también en plataformas de otros fabricantes. La idea de Google con *Weave* es que sea un lenguaje común para que los dispositivos puedan comunicarse y entenderse entre ellos y con otros que utilicen otros SO.

De esta forma, con Brillo y *Weave*, Google propone su propio estándar para la Internet de las Cosas [42].

6.5.7. Samsung SmartThings

Otro gigante de las telecomunicaciones, Samsung, también se está introduciendo en el mercado de la Internet de las Cosas. En 2014, Samsung compró la empresa Smart Things y un año después, en la feria tecnológica IFA 2015 [43], presentaron su solución para la Internet de las Cosas.

Samsung SmartThings es el ecosistema que Samsung quiere crear par la IoT. Para ello, se sirve de un Hub que será el centro neurálgico del sistema con unas 10 horas aproximadas de autonomía, en las que la seguridad del sistema estará bajo su control.

También se podrá monitorizar toda la información del sistema mediante la app de Samsung "Smart Home Monitor". Los dispositivos del ecosistema Samsung SmartThings

estarán conectados mediante ZigBee o Z-Wave [44] [45].

6.5.8. Intel IoT Gateways

La solución de Intel para la Internet de las Cosas, llamada “IoT Gateways” ofrece una gran flexibilidad a los desarrolladores para para diseñar y desarrollar sus propias soluciones para el IoT, de forma que dichas soluciones sean rentables, seguras e innovadoras para una amplia gama de segmentos de negocios. Esta solución IoT de Intel ofrece procesadores (de Intel) para diferentes aplicaciones y soporte para múltiples sistemas operativos como Ubuntu Linux, Wind River (orientado a sistemas embebidos) o el ya mencionado anteriormente Windows 10.

Un aspecto muy interesante a tener en cuenta de la solución IoT Gateways de Intel es que está pensada para facilitar la conexión de los sistemas antiguos (es decir, los que están disponibles ahora o han ido apareciendo en los últimos años fruto de las redes de sensores y/o la domótica) con los sistemas nuevos que vayan apareciendo con el desarrollo de la Internet de las Cosas.

7. ANÁLISIS DE LA NORMATIVA ESPAÑOLA Y EUROPEA PARA LA INTEGRACIÓN DE DISPOSITIVOS INTELIGENTES EN EL HOGAR DIGITAL

Una vez realizado un estudio de las distintas tecnologías inalámbricas existentes en la actualidad, con sus pros y sus contras de cara a la aplicación que se les quiere dar, y analizados los principales componentes de chip de radio que ofrecen los distintos fabricantes líderes en el mercado, es hora de tratar en profundidad el principal concepto que ocupa a este estudio, el Hogar Digital.

En los próximos apartados se verá en que consiste el Hogar Digital, qué requisitos y prestaciones tiene, así como la normativa que regula la instalación de hogares digitales actualmente. Será en función de estas normativas donde se realizará el estudio y análisis de cómo implementar los conocimientos adquiridos en los puntos anteriores para dotar a los dispositivos que conformen el nuevo Hogar Digital de inteligencia y conectividad entre ellos.

7.1 El hogar digital

Según se especifica el Real Decreto 346/2011, de 11 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento regulador de las infraestructuras comunes de telecomunicaciones para el acceso a los servicios de telecomunicación en el interior de las edificaciones, que actualiza el Real Decreto 1/1998, el Hogar Digital se define como:

“El lugar donde, mediante la convergencia de infraestructuras, equipamientos y servicios, son atendidas las necesidades de sus habitantes en materia de confort, seguridad, ahorro energético e integración medioambiental, comunicación y acceso a contenidos multimedia, teletrabajo, formación y ocio.”

Para su implantación, el hogar digital se divide en diferentes grupos que pueden definirse de la siguiente manera [46] [47]:

- Comunicaciones

Estos servicios proporcionan el medio de transporte de la información. Dicha información puede ser en forma de voz, datos o imagen entre los usuarios y los distintos dispositivos/servicios, o entre los distintos dispositivos que conforman el Hogar Digital. **Es un servicio básico del Hogar Digital.**

- Eficiencia Energética

Aquí se engloban los servicios que permiten al Hogar Digital desarrollar su potencial para conseguir significativos ahorros de energía en comparación con un hogar convencional. Siguiendo las pautas del Código Técnico de la Edificación, estará diseñado para una gestión inteligente de la climatización y la iluminación, así como del resto de las cargas de la vivienda. El control de la misma también debe llegar a regular el consumo de energía según el grado de ocupación de la vivienda.

- Seguridad

Estos servicios permiten controlar, de forma local o remota, cualquier zona de la vivienda y cualquier incidencia relativa a la seguridad del hogar, bienes, y/o de las personas, como intrusiones en la vivienda, fugas de agua o gestión de emergencias. Cualquiera de estos eventos se comunican mediante avisos al propio usuario o a un centro proveedor de servicios. En el servicio se incluye la secuencia de servicio de detección, aviso y, si se da el caso, actuación. **Es un servicio básico del Hogar Digital.**

- Control del entorno

Estos servicios incluyen los conceptos de automatización de la iluminación, los cerramientos motorizados (persianas, toldos, puertas, etc.), y el control de la temperatura y climatización. De esta forma se consigue favorecer que la vivienda alcance el grado máximo de flexibilidad, economía, integración de datos heterogéneos, confort, seguridad y comunicación eficaz en su operación y mantenimiento.

Los Sistemas de Control General de una vivienda deben disponer de una tecnología avanzada que sea:

- a) Fácil en su implantación y, sobre todo, en su utilización por el usuario final.
- b) Segura en lo que se refiere a su funcionamiento y eficacia.
- c) Con alta capacidad de comunicación interna, tanto de visualización de estados, como de posibilidades de actuación para el usuario. Al tiempo que con sus entornos exteriores.

- Acceso interactivo a contenidos multimedia

En este grupo de servicios se incluyen aquellos servicios que se prestan de una manera remota por proveedores de servicios de información o de otro tipo de servicios y que implican el transporte de contenidos multimedia de diverso propósito. Entre ellos cabe citar a los servicios característicos de la nueva Sociedad de la Información, como la tele-asistencia, la tele-educación, el tele-trabajo, etc.

- Ocio y entretenimiento

Estos servicios permiten a las personas disfrutar de sus ratos libres de forma pasiva o interactiva, con contenido multimedia que puede ser accedido desde un equipo reproductor/visualizador. Dicho contenido puede encontrarse en el hogar o bien ser recibido de fuentes externas, mediante una infraestructura de telecomunicaciones de banda ancha.

Una vez visto cómo se definen los diferentes grupos que conforman el Hogar Digital, se van a especificar cuáles son los servicios individualizados que ofrecen cada grupo. Algunos de estos servicios pueden tener relación con más de un grupo, pero aparecen listados en el grupo donde tienen más impacto.

- Comunicaciones

- a) Telefonía Básica
- b) Acceso a Internet con banda ancha
- c) Red de Área Doméstica
- d) Telefonía IP
- e) Videotelefonía

- Eficiencia energética

- a) Gestión de dispositivos eléctricos
- b) Gestión de electrodomésticos
- c) Gestión del riego
- d) Gestión del agua
- e) Gestión circuitos eléctricos prioritarios
- f) Monitorización de consumos

g) Control de consumos

h) Control de iluminación

- Seguridad

a) Alarmas técnicas de incendio y/o humo

b) Alarmas técnicas de gas (si existe)

c) Alarmas técnicas de inundación (zonas húmedas)

d) Alarmas de Intrusión

e) Alarma Pánico SOS

f) Control de accesos: Vídeo – portero

g) Control de accesos: tarjetas proximidad

h) Videovigilancia

i) Teleseguridad: Central Receptora de Alarmas

- Control de entorno

a) Simulación de presencia

b) Telemonitorización

c) Telecontrol

d) Automatización y control de toldos y persianas

e) Creación de ambientes

f) Control de temperatura y climatización

g) Diagnostico y mantenimiento remoto

- Eficiencia energética

a) Gestión de dispositivos eléctricos

b) Gestión de electrodomésticos

c) Gestión del riego

d) Gestión del agua

e) Gestión circuitos eléctricos prioritarios

- f) Monitorización de consumos
- g) Control de consumos
- h) Control de iluminación

- Acceso interactivo a contenidos multimedia

- a) Tele-asistencia básica
- b) Videoconferencia
- c) Tele-trabajo / Tele-educación

- Ocio y entretenimiento

- a) Radio difusión Sonora (AM, FM, DAB)
- b) Televisión digital terrestre
- c) Televisión por satélite/cable
- d) Vídeo bajo demanda (VOD)
- e) Distribución multimedia
- f) Televisión IP
- g) Música on-line
- h) Juegos on-line.

Según los diferentes servicios que tenga un Hogar Digital en los diferentes grupos, puede obtenerse un Hogar Digital con calificación básica, media o alta atendiendo a la tabla que se muestra a continuación:

TABLA PUNTUACIÓN NIVELES HOGAR DIGITAL							
Servicios	Seguridad	Control del Entorno	Eficiencia Energética	Ocio y Entretenimiento	Comunicaciones	Acceso Interactivo a Contenidos Multimedia	Puntuación Total
Hogar digital alto	50	40	50	25	25	10	200
	45	40	45	15	25	10	180
Hogar digital medio	40	35	40	10	20	5	150
	35	30	30	10	20	5	130
Hogar digital básico	15	25	25	10	20	5	100
	15	15	15	10	20	5	80

Tabla 13: Tabla de puntuación de niveles del Hogar Digital

Los criterios para determinar cómo conseguir cada uno de los tres niveles de “Hogar Digital” son los siguientes:

- El hogar debe disponer de un número mínimo de servicios y cubrir todas las áreas o grupos de servicios.
- Los servicios tienen diferentes funcionalidades que han sido ponderadas. La suma de las funcionalidades y ponderaciones de un servicio proporciona un baremo para la puntuación otorgada a dicho servicio.
- El “hogar digital básico” – y todos los demás – debe poseer todos los servicios y las funcionalidades descritas en la Tabla de Servicios (Anexo 1) y estar entre los valores señalados en la tabla que se muestra más abajo. Así por ejemplo continuando con el “hogar digital básico”, la puntuación que debe obtener valorando los diferentes servicios, debe estar entre los 80 y 100 puntos.
- En estas puntuaciones, se debe respetar los intervalos que cada área de servicios debe tener. Así, por ejemplo, continuando con “un Hogar Digital básico”, en un total de una puntuación de 100 puntos máxima, se ha concedido a la Seguridad un 15% de la puntuación total, a Control del Entorno un 25%, a Eficiencia Energética un 25%, a Ocio y Entretenimiento un 5%, a Comunicaciones un 15% y a Acceso Interactivo a Contenidos Multimedia un 15%.

- El “hogar digital básico” también puede alcanzarse con una puntuación de 80 puntos siempre que los mismos aparezcan con los mínimos señalados: 15 de Seguridad, 15 de Control del Entorno, 15 de Eficiencia Energética, 10 de Ocio y Entretenimiento, 20 de Comunicaciones y 5 de Acceso Interactivo a Contenidos Multimedia.

- De la misma manera se pueden evaluar los “hogares digitales medio y alto”.

A continuación se muestra el apartado de “Eficiencia Energética” de la Tabla de Servicios con las que se evaluará el hogar digital, extraída del Anexo V del BOE 346/2011:

Control de iluminación	Reguladores lumínicos con programación de escenas	En salón (o sala dedicada al ocio)	5
		En salón (o sala dedicada al ocio) y dormitorios	8
	Dispositivo con función crepuscular o astronómica en jardín o grandes terrazas	Si	1
	Conexión/desconexión general de la iluminación	En un acceso a la vivienda	8
		En todos los accesos a la vivienda	10
	Dispositivos de encendido y apagado por detección de presencia	En entrada	5
		En todas las zonas de paso	7
		En entrada, todas las zonas de paso y baños y aseos	9
	Reguladores de nivel de iluminación por medición de luz natural	En salón	7
		En salón y dormitorios	9
		En salón, dormitorios y cocina	11

Tabla 14: Extracto de la Tabla de Servicios del Hogar Digital, Eficiencia Energética

Así, si se toma como referencia un interruptor eléctrico de la luz adaptado al Internet de las Cosas, en función de la Tabla de Servicios del Hogar Digital habría que acudir al apartado de “Control de Iluminación”, donde se puede comprobar que “Dispositivos de conexión/desconexión general de la iluminación puede obtener hasta una puntuación de 10 puntos si se aplica en todos los accesos de la vivienda, cumpliendo con los servicios de “Confort” y “Eficiencia Energética”.

Del mismo modo, un interruptor eléctrico de la Internet de las Cosas también puede estar dentro de la categoría de “Dispositivos de encendido y apagado por detección de presencia”, donde puede alcanzar un máximo de 9 puntos si está operativo en la entrada,

todas las zonas de paso y baños y aseos de la vivienda, cumpliendo también con los servicios de “Confort” y “Eficiencia Energética”.

Por último, con la Internet de las Cosas también podemos dotar al interruptor eléctrico de la capacidad de ser un “Dispositivo regulador de nivel de iluminación por medición de luz natural”, lo que puede aportar al Hogar Digital un máximo de 11 puntos si se encuentra en el salón, dormitorios y cocina. Y como en los otros dos aspectos, cumpliendo con los servicios de “Confort” y “Eficiencia Energética”.

7.2. Estudio de la normativa

Según el Real Decreto 842/2002 por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico de baja tensión, en el apartado ITC-BT-51 se define un Sistema de Automatización, Gestión de la Energía y Seguridad para Viviendas y Edificios como:

“Aquel sistema centralizado o descentralizado capaz de recoger información proveniente de unas entradas (sensores o mandos), procesarla y emitir órdenes a unos actuadores o salidas, con el objeto de conseguir confort, gestión de la energía o la protección de personas, animales y bienes”

Estos sistemas pueden tener la posibilidad de acceso a redes exteriores de comunicación, como en el caso que concierne a este estudio, Internet.

Dentro de estos sistemas, la normativa especifica éstas tres definiciones:

- **Nodo:** Cada una de las unidades del sistemas capaces de recibir y procesar información.
- **Actuador:** Es el dispositivo encargado de realizar el control de algún elemento del Sistema.
- **Dispositivo de entrada:** Sensor, mando a distancia, teclado u otro dispositivo que envía información al nodo.

La normativa ofrece la posibilidad de que estos tres elementos puedan ser independientes o combinados en una o varias unidades distribuidas. Como ya se vio anteriormente, el objetivo de la Internet de las Cosas aplicado al Hogar Digital, es que cada dispositivo sea inteligente y capaz de comunicarse con otros, por tanto se pueden agrupar estos tres elementos en un mismo dispositivo. Además, es por esto que el sistema resultante que se busca es un sistema descentralizado, que el Real Decreto define de la siguiente manera:

“Un sistema descentralizado es aquel en el que todos sus componentes comparten la misma línea de comunicación, disponiendo cada uno de ellos de funciones de control y mando”.

7.2.1. Requisitos de la Instalación

Todos los elementos del Sistema deben cumplir una vez instalados los requisitos de Seguridad y Compatibilidad Electromagnética conforme a lo establecido en la legislación nacional que desarrolla la Directiva de Baja Tensión (2006/95/CE) y la Directiva de Compatibilidad Electromagnética (2004/108/CE). Si los elementos están incorporados en otros aparatos se atenderán, en lo que sea aplicable, a los requisitos establecidos para dichos aparatos.

Todos los elementos que se instalen en el sistema deberán incorporar instrucciones sobre las condiciones de instalación y uso que deban cumplirse, para garantizar la seguridad y compatibilidad electromagnética de la instalación. Si no se requieren condiciones especiales, deberá indicarse expresamente en las instrucciones. Estas instrucciones se incorporarán al proyecto o memoria técnica de diseño según lo establecido en la ITC-BT-04 del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión.

Según lo establecido en el Reglamento electrotécnico de baja tensión, una instalación de muy baja tensión es la que comprende tensiones nominales que no exceden los 50V en c.a y los 75V en c.c. Cuando el sistema domótico esté alimentado en este rango de tensiones o la interconexión entre dispositivos esté realizada en muy baja tensión, las instalaciones e interconexiones seguirán lo indicado en la ITC-BT-36 del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión.

Esto es, en dicha ITC-BT-36 se especifican algunos requisitos para instalaciones de baja tensión de seguridad (MBTS) y muy baja tensión de protección (MBTP), tales como:

1 - Referidas a las fuentes de alimentación

Las instalaciones deben estar alimentadas mediante una fuente que incorpore alguno de los siguientes componentes:

- Un transformador de aislamiento de seguridad. En el caso de la MBTP el transformador puede ser con aislamiento principal siempre y cuando exista un sistema de protección en el circuito primario por corte automático de la alimentación.
- Una fuente corriente que asegure un grado de protección equivalente al del transformador de seguridad anterior.
- Una fuente electroquímica (pilas o acumuladores), que no dependa o que

esté separada con aislamiento de protección de circuitos a MBTF (muy baja tensión funcional) o de circuitos de tensión más elevada.

- Otras fuentes que no dependan de la MBTF o circuitos de tensión más elevada.
- Determinados dispositivos electrónicos en los cuales se han adoptado medidas para que, en caso de primer defecto, la tensión de salida no supere los valores correspondientes a muy baja tensión.

En el caso que ocupa este estudio, al tratarse de chips que ofrecen comunicación inalámbrica al dispositivo y que como se ha visto en los anteriores puntos del documento, son alimentados mediante baterías y/o pilas, se estaría cumpliendo con uno de los requisitos, en este caso con el de “fuente electroquímica”, por lo que se cumpliría esta especificación de la ITC-BT-36.

2 - Referidas a condiciones de instalación de los circuitos

La separación de protección entre los conductores de cada circuito MBTS o MBTP y los de cualquier otro circuito debe ser realizada por una de las disposiciones siguientes:

- La separación física de los conductores.
- Los conductores de los circuitos MBTS o MBTP deben estar provistos de una cubierta no metálica además de su aislamiento principal.
- Los conductores de los circuitos a tensiones diferentes, deben estar separados entre sí por una pantalla metálica conectada a tierra o por una vaina metálica conectada a tierra.
- Un cable multiconductor o un agrupamiento de conductores, pueden contener circuitos a tensiones diferentes, siempre que los conductores de los circuitos MBTS o MBTP estén aislados, individual o colectivamente, para la tensión más alta que tienen que soportar.

Así mismo, las tomas de corriente de los circuitos MBTS y MBTP deben satisfacer las siguientes prescripciones:

- Los conectores no deben poder entrar en las bases de toma de corriente alimentadas por otras tensiones.
- Las bases deben impedir la introducción de conectores concebidos para

otras tensiones.

· Los conectores de los circuitos MBTS no deben poder entrar en las bases de enchufe MBTP, y viceversa.

Puesto que el objetivo de este estudio es la implementación de chips inalámbricos, estas premisas no deberían importar a priori, pero ya que la intención es que dichos chips inalámbricos vayan implementándose en el mayor número de objetos posibles de un hogar (tales como electrodomésticos, por ejemplo) es importante tener estas premisas en cuenta para poder cumplir con la normativa vigente. Sobre todo si se pretende ofrecer una solución completa de la Internet de las Cosas de cara al usuario final.

Volviendo a lo especificado en el ITC-BT-51 del reglamento electrotécnico de baja tensión, un sistema domótico puede combinar varios tipos de sistemas, debiendo cumplir los requisitos aplicables en cada tipo de sistemas. Dichos tipos son los siguientes según la normativa:

- Sistemas que usan en todo o en parte señales que se acoplan y transmiten por la instalación eléctrica de Baja Tensión, tales como sistemas de corrientes portadoras.
- Sistemas que usan en todo o en parte señales transmitidas por cables específicos para dicha función, tales como cables de pares trenzados, coaxial, fibra óptica, etc.
- Sistemas que usan señales radiadas, tales como ondas de infrarrojo, radiofrecuencia, ultrasonidos, o sistemas que se conectan a la red de telecomunicaciones.

Puesto que en este documento se pretende estudiar la implementación de la Internet de las Cosas al Hogar Digital mediante tecnologías inalámbricas, es en el último tipo de sistema el que interesa profundizar, ya que los chips que se estudiaron en el apartado 6 eran chips para dotar a los dispositivos conectados de radiofrecuencia y acceso a Internet.

Por ello, en base a la normativa presente en el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, se establece para los sistemas que usan señales radiadas que, los emisores de los sistemas que usan señales de radiofrecuencia o señales de telecomunicación, deberán cumplir la legislación vigente del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias

de Ordenación de las Telecomunicaciones.

En el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias de Ordenación de las Telecomunicaciones, aprobado en la Orden IET/787/2013, de 25 de abril, se especifica en la Nota UN-85 las especificaciones para redes LAN y de datos comprendidas en el rango de frecuencias desde los 2400 MHz hasta los 2483.5 Mhz (los dispositivos que se analizaron en el apartado 6 operaban en la banda de frecuencias ISM de 2.4 Ghz).

La banda de frecuencias 2400-2483,5 MHz, designada en el Reglamento de Radiocomunicaciones para aplicaciones ICM, podrá ser utilizada también para los siguientes usos de radiocomunicaciones bajo la consideración de uso común:

- a) Sistemas de transmisión de datos de banda ancha y de acceso inalámbrico a redes de comunicaciones electrónicas incluyendo redes de área local. Estos dispositivos pueden funcionar con una potencia isotrópica radiada equivalente (p.i.r.e.) máxima de 100 mW conforme a la Decisión de la Comisión 2011/829/UE y la Recomendación CEPT ERC/REC 70-03, anexo 3. Además, la densidad de potencia (p.i.r.e.) será de 100 mW/100 kHz con modulación por salto de frecuencia y de 10 mW/MHz con otros tipos de modulación. En ambos casos, se deberán utilizar técnicas de acceso y mitigación de interferencias con rendimiento al menos equivalente a las técnicas descritas en las normas armonizadas según la Directiva 1999/5/CE. En cuanto a las características técnicas de estos equipos, la norma técnica de referencia es el estándar ETSI EN 300 328 en su versión actualizada.
- b) Dispositivos genéricos de baja potencia en recintos cerrados y exteriores de corto alcance, incluyendo aplicaciones de video. La potencia isotrópica radiada equivalente máxima será inferior a 10 mW conforme a la Decisión de la Comisión 2011/829/UE y la Recomendación CEPT ERC/REC 70-03, Anexo 1, siendo la norma técnica de referencia el estándar ETSI EN 300 440.

7.3. La Agenda Europea

Debido a la crisis económica que ha afectado al mundo durante los últimos años, Europa ha visto afectado su progreso económico y social, poniendo en relieve problemas estructurales de la economía europea y creando al necesidad de idear y aplicar nuevas reformas para revertir esta situación en el futuro.

Con este propósito de estudiar dichos problemas y adoptar distintas soluciones, en 2010 los estados miembros se reunieron y pusieron en marcha un plan de crecimiento económico sostenible, al cual llamaron “La Estrategia Europa 2020” [48].

En dicha estrategia se recurre a medidas destinadas a estimular el crecimiento y a preparar la economía europea para el futuro. Para lograr todo esto, la Unión Europea estableció para 2020 cinco objetivos en materia de empleo, innovación, educación, integración social y clima/energía. Estos cinco objetivos son los siguientes [48]:

- 1· Garantizar el empleo al 75% de las personas de 20 a 64 años.

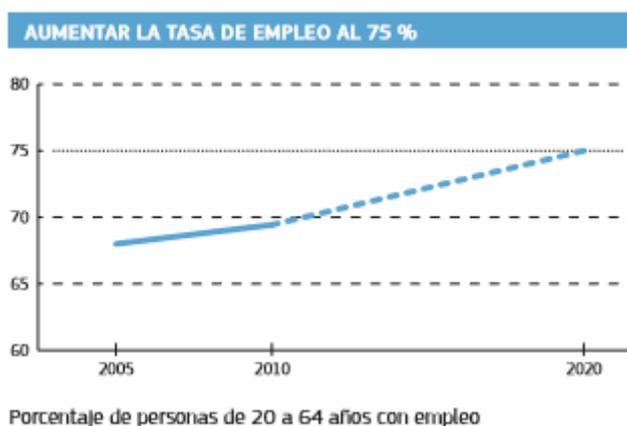


Figura 39: Gráfica objetivo empleo Agenda 2020

2· Invertir el 3% del PIB de la Unión Europea en investigación y desarrollo.

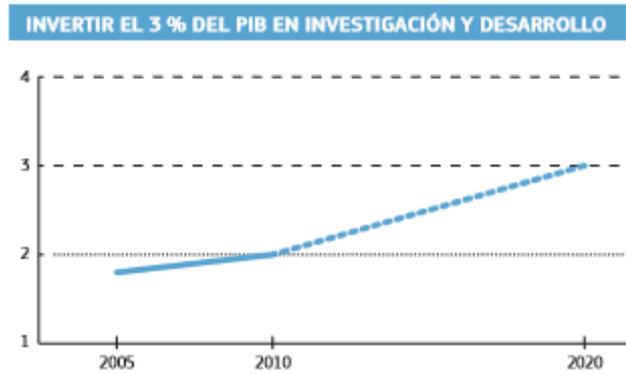


Figura 40: Gráfica objetivo inversión en desarrollo Agenda 2020

3· Situar las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% (o incluso 30%) por debajo de los niveles de 1990, generar el 20% de nuestras necesidades de energía a partir de fuentes renovables y aumentar la eficacia energética en un 20%.

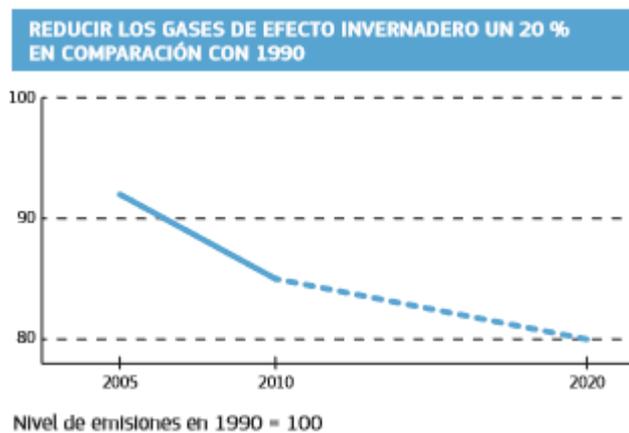


Figura 41: Gráfica objetivo reducción de gases Agenda 2020

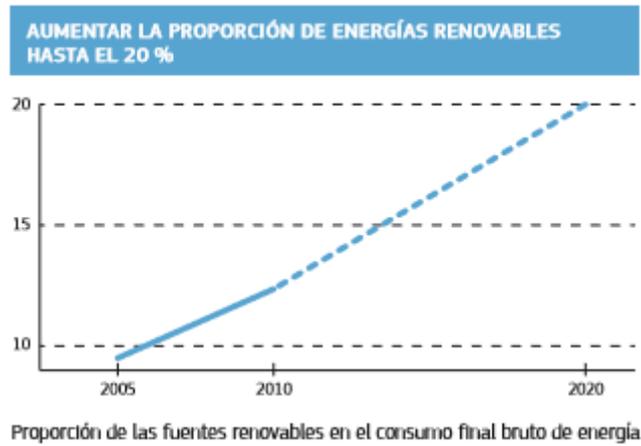


Figura 42: Gráfica objetivo energías renovables Agenda 2020

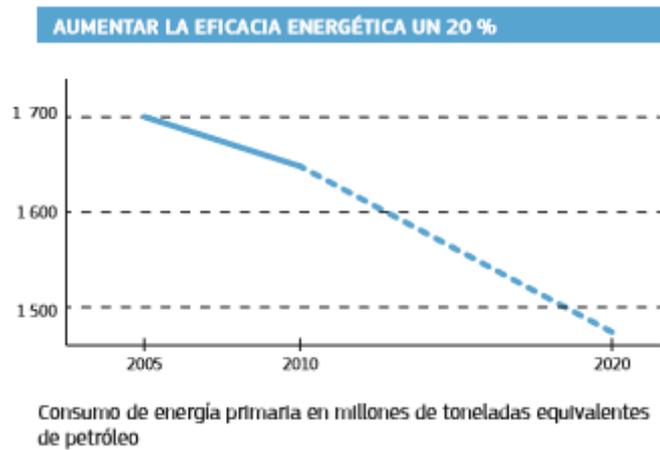


Figura 43: Gráfica objetivo eficacia energética Agenda 2020

4· Reducir las tasas de abandono escolar por debajo del 10% y lograr que al menos un 40% de las personas de 30 a 34 años hayan terminado estudios superiores.

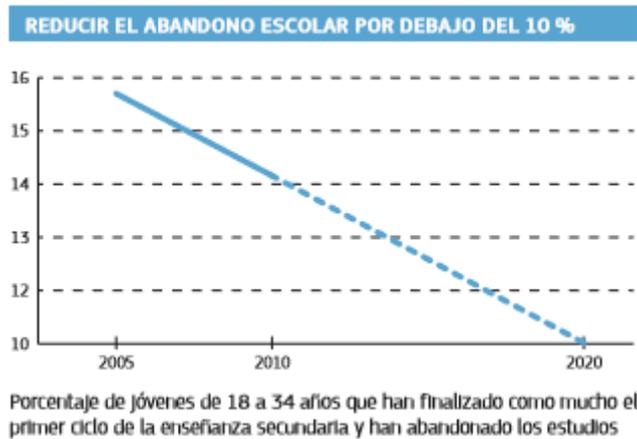


Figura 44: Gráfica objetivo reducción abandono escolar Agenda 2020

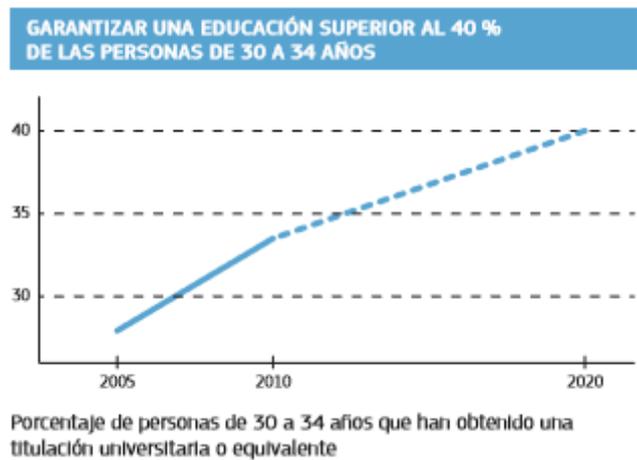


Figura 45: Gráfica objetivo educación superior Agenda 2020

5. Reducir al menos en 20 millones el número de personas en riesgo de pobreza o exclusión social.

Para conseguir alcanzar estos objetivos, los estados miembros deben ir aplicando una serie de reformas de manera combinada entre ellos. Dicha coordinación de políticas se llevan a cabo en el llamado semestre europeo. Según la orientación adoptada en el semestre europeo, los estados miembros tienen que elaborar dos programas: un programa nacional de reformas y un programa de estabilidad o convergencia.

A continuación se ofrece un gráfico donde se muestra las diferentes etapas del calendario del semestre europeo respecto a los diferentes programas a elaborar por los estados miembros de la unión europea.

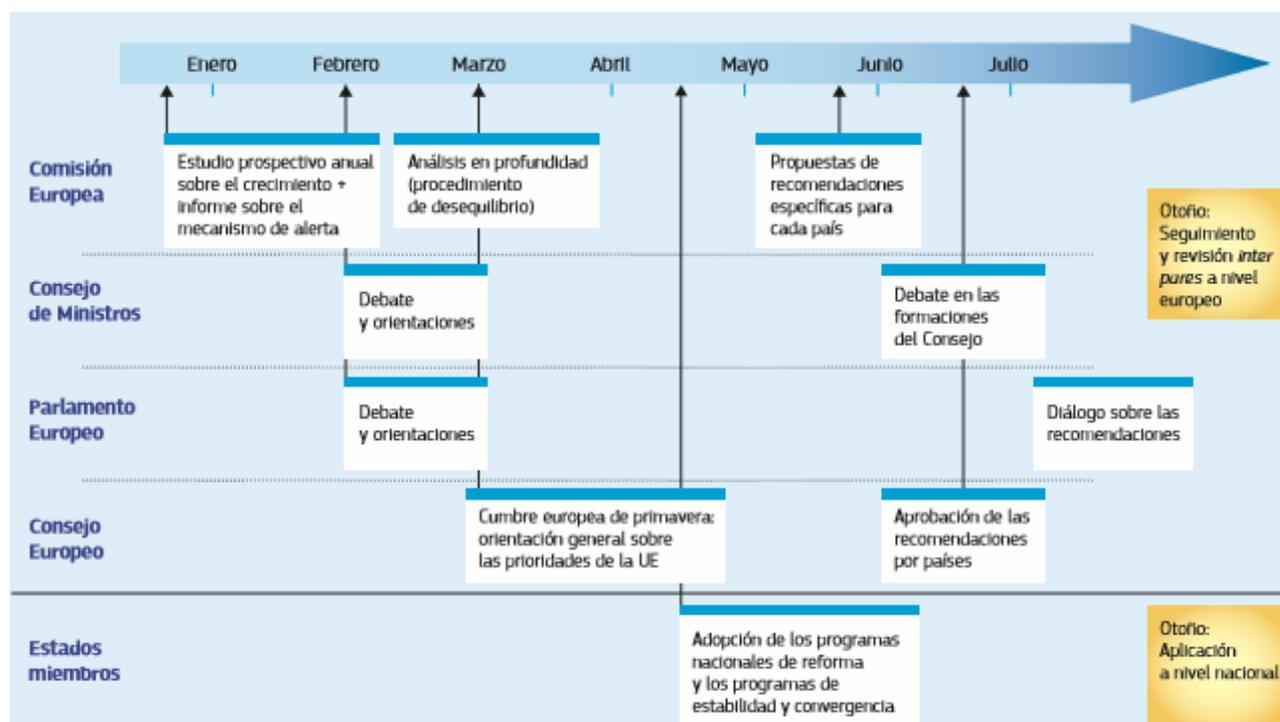


Figura 46: Calendario del semestre europeo

Con la Internet de las Cosas, se daría un paso adelante muy importante de cara a cumplir los objetivos planteados en la Agenda Digital Europea, ya que gracias a la importancia que se intuye que alcanzará la Internet de las Cosas abarcándolo todo, también daría un gran impulso a a las áreas de empleo, innovación, educación, integración social y clima/energía que preocupan a la Unión Europea.

La Internet de las Cosas favorecería la creación de empleo, ya que al igual que se estima que en el año 2020 haya 50 mil millones de dispositivos conectados, harán falta muchos trabajadores que se encarguen de mantener/diseñar toda la infraestructura. Según un informe elaborado por VisionMobile [49], en 2014 tan solo había 300.000 desarrolladores trabajando en la Internet de las Cosas, y se estima que cada año la demanda se irá incrementando un 57% hasta alcanzar los 4.5 millones de desarrolladores en 2020. Tanta demanda de personal cualificado ayudará a garantizar el objetivo de que el 75% de las personas de 20 a 64 años tengan empleo, a la vez que

aumentará la demanda en la educación en el sector tecnológico, por lo que también puede favorecer el cumplimiento de los objetivos en educación de la Agenda Europea.

Otro objetivo de la Agenda Europea 2020 donde la Internet de las Cosas adquiere una gran importancia es el de “invertir 3% del PIB de la Unión Europea en investigación y desarrollo”, ya que el IoT es una tecnología nueva y embrionaria aún, por lo que es necesaria una gran inversión y un gran desarrollo. Además, dicha inversión, de hacerse a tiempo y correctamente, podría acarrear grandes beneficios para la Unión Europea en general y para sus Estados miembros en particular. Según un informe de Accenture [50] [51], si se invirtiera un 50% más en tecnologías IoT, Alemania podría generar una ganancia aproximada de en torno a 700.000 millones de PIB acumulado (lo que supone un 1,7% por encima de las previsiones). Y si lo hiciera Reino Unido la ganancia podría ser de unos 531.000 millones (un 1,8% más).

7.4. Alianza para la Innovación Internet de las Cosas

En 2015 se creó la Alianza para la Innovación Internet de las Cosas, AIOTI por sus siglas en inglés (*Alliance for IOT Innovation*) a nivel europeo [52] para, entre otras actividades, dar soporte a la Comisión Europea en relación al futuro de la I+D+i en Internet de las Cosas y temas como la estandarización del IoT. Para ello en la AIOTI se han creado diferentes grupos de trabajos (*working groups*) que son los siguientes:

- WG 1: IoT European Research Cluster
- WG 2: Innovation Ecosystems
- WG 3: IoT Standardisation
- WG 4: Policy issues
- WG 5: Smart living environments for ageing well
- WG 6: Smart farming and food security
- WG 7: Wearables
- WG 8: Smart cities
- WG 9: Smart mobility
- WG 10: Smart Environment (smart water management)
- WG 11: Smart Manufacturing

7.5. Normativa en otros países fuera de la Unión Europea

El análisis de las diferentes normativas para la posible regularización de la Internet de las Cosas que se trata en este estudio, concierne a la normativa española y europea exclusivamente. No obstante, de cara a una línea de trabajo futuro, se exponen a continuación algunas de las organizaciones dedicadas a la estandarización tanto en mercados líderes en la actualidad, por ejemplo EE.UU, Japón y Corea del Sur, como en mercados emergentes, por ejemplo China, así como el estado actual de dicha normativa en estos países [53].

En el estudio de mercado realizado en el apartado 6 de este documento, se vieron como grandes empresas del mundo tecnológico ya estaban desarrollando sus propias plataformas y soluciones para la Internet de las Cosas, como es el caso de las estadounidenses Texas Instruments, Google y Microsoft. La mayoría de estas empresas estadounidenses están bien posicionadas en el mercado y son referentes a nivel internacional, teniendo que adaptarse a las diferentes normativas de cada zona geográfica. En EE.UU, las organizaciones que se encargan de la estandarización de las normativas referentes a la Internet de las Cosas son la *Alliance for Telecommunications Industry Solutions* (ATIS) y la *Telecommunications Industry Association* (TIA).

Otro gigante tecnológico es Japón, donde la *Association of Radio Industries and Businesses* (ARIB) es la encargada de elaborar las diferentes normativas referentes a los dispositivos M2M. En Corea del Sur, con Samsung como máximo exponente, la *Telecommunications Technology Association* (TTA) es la organización que se encarga de la estandarización.

El mercado chino es uno de los más emergentes en la actualidad. Numerosas empresas tecnológicas y de telecomunicaciones están alcanzando una gran cuota de mercado tanto dentro como fuera de sus fronteras, y con ello están desarrollando sus propios proyectos de I+D referente a la Internet de las Cosas. Es el caso, por ejemplo, de Huawei con su *Agile IoT Solution*, o Xiaomi con su *Mi Ecosystem*.

En cuanto a la estandarización de la Internet de las Cosas en China [54], las organizaciones encargadas son, principalmente, *China Communications Standards Association* (CCSA) y *China Standardization Working Group on Sensor Networks* (WGSN).

En 2010, se estableció en China el *IoT Centre* [55] en la ciudad de Shanghai, tras el anuncio del gobierno chino de que la Internet de las Cosas tendría una importancia crítica

para los planes de información y comunicación tecnológica del país. Así mismo, el ministerio de Industria e Información Tecnológica de China publicó un plan de desarrollo en 2012 con el gran objetivo de incrementar la Internet de las Cosas con vistas a 2020. Este plan podría decirse que es para China similar a la Estrategia Europa 2020 lanzada por la Unión Europea referente a la Internet de las Cosas.

8. ELECCIÓN DE TECNOLOGÍA INALÁMBRICA Y SU CHIP MÁS APROPIADO.

En el apartado 5.6 de este estudio se hizo una primera aproximación de la tecnología 6LoWPAN y en el apartado 5.8 tras hacer una comparativa de las diferentes tecnologías inalámbricas, se llegó a la conclusión de que las tecnologías más aptas para la extensión de la Internet de las Cosas al hogar eran ZigBee y 6LoWPAN.

De estas dos tecnologías inalámbricas, a continuación se va a desarrollar en mayor profundidad 6LoWPAN, ya que en este estudio se considera más adecuada para la extensión de la Internet de las Cosas al hogar 6LoWPAN que ZigBee, esto es debido a que a día de hoy ZigBee está más asentado en el mundo de la domótica, mientras que 6LoWPAN aproveche toda la estructura de IPv6 dominante en el mundo de Internet le da cierta ventaja de cara que todos los objetos además de estar conectados entre ellos lo estén también a Internet.

8.1. Una primera aproximación a 6LoWPAN

6LoWPAN - "*IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks*" - es una tecnología de red o capa de adaptación que permite que los paquetes IPv6 sean transmitidos eficientemente sin pequeñas tramas de la capa de enlace, tal y como está definido por IEEE 802.15.4. Como se ha dicho antes, el uso de la infraestructura basada en IP hace que tome una amplia ventaja con respecto a otras tecnologías, ya que facilita el desarrollo de estándares abiertos y la interoperabilidad largamente demostrada a través de todos estos años de Internet.

6LoWPAN es un estándar abierto definido en diversas RFC's. Una característica muy importante a tener en cuenta de 6LoWPAN es que fue originalmente concebido para soportar redes inalámbricas de bajo consumo IEEE 802.15.4 en la banda de 2.4 Ghz, y ahora está siendo adaptado a otros medios como Bluetooth Smart, PLC y Wi-Fi de bajo consumo.

Las distintas RFC's que definen a 6LoWPAN son las siguientes:

- Estándar:

- RFC 4944 → Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks
- RFC 6282 → Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks

- RFC 6775 → Neighbor Discovery Optimization for IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs)

- Informativas:

- RFC 4919 → IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals

- RFC 6568 → Design and Application Spaces for IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs)

- RFC 6606 → Problem Statement and Requirements for IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Network (6LoWPAN) Routing

En apartados posteriores se analizarán en profundidad la RFC 4944 y las actualizaciones que se han realizado en dicha RFC mediante la RFC 6282.

8.2. Arquitectura de 6LoWPAN

A continuación se muestra un ejemplo de como sería una red 6LoWPAN mallada y su respectiva representación visual en la Figura 47 [56], donde el acceso a Internet es manejado por un Access Point (AP) que actúa como un router IPv6. Diferentes dispositivos típicos como pueden ser PC's, servidores, tabletas, teléfonos inteligentes, etc. son conectados al AP con una configuración típica. La red 6LoWPAN se conectaría a la red IPv6 mediante un router frontera (*edge router*).

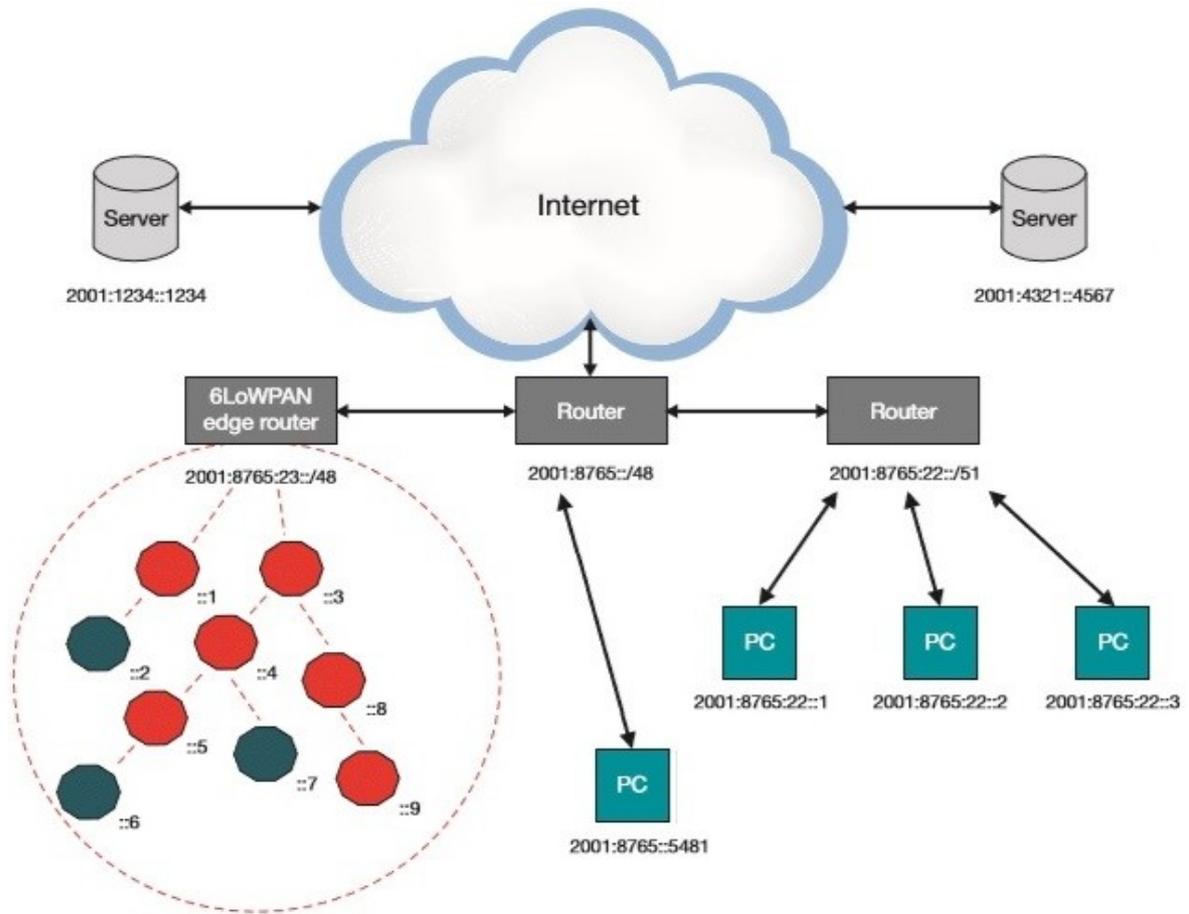


Figura 47: Ejemplo de red mallada 6LoWPAN

Dicho router frontera maneja tres acciones:

- 1) El intercambio de datos entre los dispositivos 6LoWPAN e Internet (u otros dispositivos de la red IPv6).
- 2) El intercambio de datos entre los dispositivos 6LoWPAN.
- 3) La generación y el mantenimiento de la subred de radio (la red 6LoWPAN).

Para comunicarse nativamente con IP, la red 6LoWPAN se conecta a otras redes simplemente usando routers IP. Puesto que 6LoWPAN solo especifica IPv6 sobre IEEE 802.15.4, los routers frontera deberían soportar mecanismos de transición de redes IPv6 a IPv4, tales como el NAT64 especificado en la RFC 6146.

Dentro de una red típica 6LoWPAN, también pueden encontrarse dos diferentes tipos de dispositivos: routers y hosts. Como su propio nombre indica, los nodos de la red

6LoWPAN que son routers pueden redirigir los datos que tienen como destino otro nodo de la red 6LoWPAN. En cambio, los hosts no son capaces de dirigir el tráfico a otros nodos de la red 6LoWPAN. Los hosts suelen ser también conocidos como “dispositivos finales” y pueden estar en modo ahorro de energía y solo activarse periódicamente para comprobar si hay datos para el dispositivo.

Se ha mencionado con anterioridad que 6LoWPAN ofrece una comunicación directa de los dispositivos a Internet a diferencia de otras tecnologías como ZigBee o Bluetooth que necesitaría de una pasarela para poder realizar esta comunicación. Esta ventaja radica en que 6LoWPAN una capa de adaptación entre el nivel de red IP y el nivel físico donde se encuentran los enlaces de radio IEEE 802.15.4.

Con la siguiente comparación gráfica entre la pila del protocolo TCP/IP dominante hoy en día en las comunicaciones por Internet y la pila de 6LoWPAN se ve más claramente.

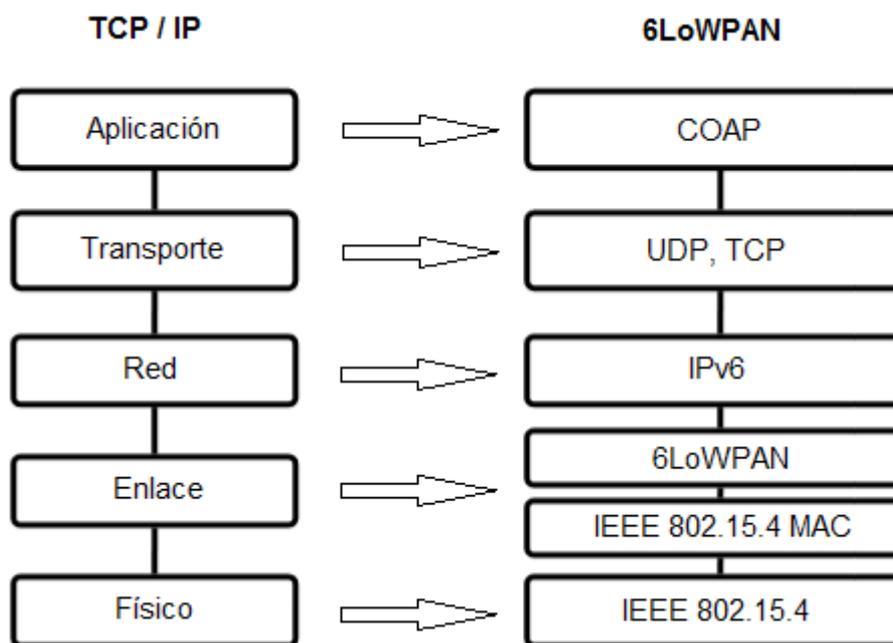


Figura 48: Comparación pila de protocolos TCP/IP y 6LoWPAN

El nivel de Enlace proporciona un enlace de datos fiable entre dos nodos directamente conectados mediante la detección y la corrección de errores que pueden ocurrir en la capa física durante la transmisión y recepción. En 6LoWPAN, el nivel de Enlace incluye la capa de acceso al medio (MAC) que proporciona acceso a los medios de comunicación, el uso de características como prevención de colisiones (CSMA-CA),

donde la radio escucha que nadie más está transmitiendo antes de enviar datos a través del aire. En 6LoWPAN, la capa MAC es IEEE 802.15.4. La capa 6LoWPAN, que proporciona la adaptación de IPv6 a IEEE 802.15.4, también reside en nivel de Enlace.

8.2.1. IPv6 sobre IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 fue diseñado para un mercado totalmente diferente al de IPv6. IPv6 se diseñó para operar en las redes actuales donde los dispositivos son de gran potencia como ordenadores y servidores y el ancho de banda de las conexiones tiene más capacidad, motivo por el que uno de los cambios de IPv4 respecto a IPv6 es el aumento de la MTU (Unidad máxima de transferencia) de 576 bytes hasta 1280 bytes. Mientras que IEEE 802.15.4 se diseñó para dispositivos de baja potencia con un bajo consumo que mantenga su funcionamiento durante más tiempo. En 802.15.4 el flujo de datos está limitado a 250 kbps y la longitud de trama está limitada a 127 bytes para asegurar una baja tasa de error en los ambientes de radiofrecuencia.

Además 6LoWPAN al formar una red mallada opera con múltiples saltos dentro de la misma red, lo cual es una diferencia importante respecto a otras redes basadas en IP como las redes Ethernet o las redes Wi-Fi.

Por todo ello, el soporte de IPv6 sobre redes 802.15.4 presenta los siguientes retos importantes:

- Los datagramas IPv6 no han sido diseñados para estar ajustados a las redes 802.15.4. Un flujo de datos bajo, una limitada capacidad de almacenamiento en búffer y datagramas con una MTU diez veces menor que el mínimo en IPv6, hacen necesarios una compresión de cabecera y fragmentación. Por ejemplo, las cabeceras IEEE 802.15.4 pueden limitar la carga efectiva a 81 bytes. Esto hace que las cabeceras IPv6 con 40 bytes, las de TCP con 20 bytes o las de UDP con 8 bytes sean demasiado grandes.
- Como IEEE 802.15.4 es, además de bajo consumo y rendimiento, un estándar que utiliza como medio de comunicación la radiofrecuencia, es propenso a interferencias, fallos de enlace y enlaces asimétricos (el nodo A puede escuchar al nodo B, pero el nodo B no puede escuchar al nodo A), por lo que requiere una capa de red que sea adaptable y sensible al mismo tiempo que de bajo consumo y eficiente.

- La topología de red más común en 6LoWPAN es una red de malla de baja potencia. Esto niega el supuesto de que un enlace es un dominio de difusión único, lo que es muy importante ya que el fundamento del descubrimiento de vecinos de IPv6 se basa en ello.

A continuación se verá como se resuelven en las RFC estandarizadas todos estos retos mencionados.

8.2.2. Compresión de cabecera, fragmentación y autoconfiguración de 6LoWPAN

La transmisión de paquetes IPv6 sobre redes IEEE 802.15.4 se encuentra definida en la RFC 4944, sin embargo la compresión del formato de los datagramas IPv6 sobre 802.15.4 fue actualizado en la RFC 6282.

El formato de un paquete 6LoWPAN respecto a 802.15.4 sería el siguiente [57]:

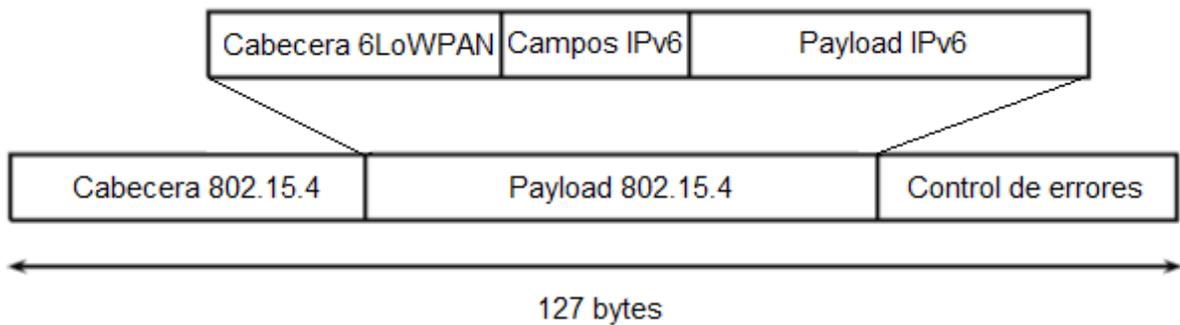


Figura 49: Formato de paquete 6LoWPAN

Donde dicha cabecera 6LoWPAN según la RFC 4944 tiene un campo denominado “dispatch” de 8 bits donde según el valor que adopte indica el tipo de cabecera 6LoWPAN de la que se trata. Estos valores son los siguientes:

00	xxxxxx	No es 6LoWPAN
01	000001	IPv6 sin compresión
01	000010	IPv6 con compresión
01	010000	Broadcast
01	111111	Prolongamiento del dispatch
10	xxxxxx	Cabecera de malla
11	000xxx	Fragmentación (primer fragmento)
11	100xxx	Fragmentación (continuación)

Tabla 15: Valores del "Dispatch" en la cabecera de 6LoWPAN

Las combinaciones de bits posibles que no están especificadas en la tabla anterior corresponden a valores reservados para usos futuros.

Con la compresión de cabecera se comprimen los 40 bytes de las cabeceras IPv6 y los 8 bytes de las cabeceras UDP asumiendo que tienen campos comunes. Los campos de cabecera se eliminan cuando se pueden derivar de la capa de enlace. La forma en la que las cabeceras se pueden comprimir fue uno de los factores que llevaron a la norma a decantarse por dar soporte a IPv6 y no a IPv4. El formato de la cabecera de compresión está definido en la RFC 6282 de la siguiente forma:

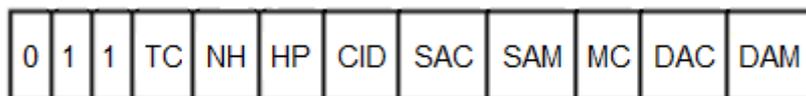


Figura 50: Formato de cabecera 6LoWPAN

Donde el significado de los campos de la cabecera es el siguiente:

TC: Traffic Class.

NH: Next Header

CID: Context IDentifier extension.

SAC: Source Address Compression.

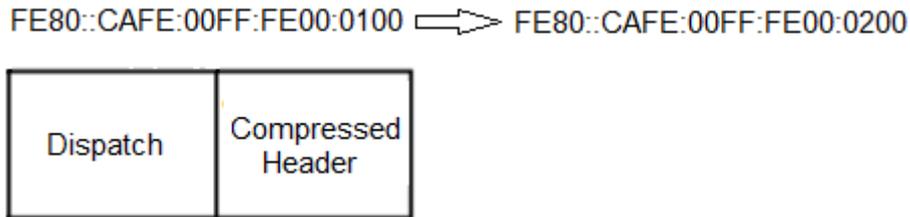
SAM: Source Address Mode.

MC: Multicast Compression.

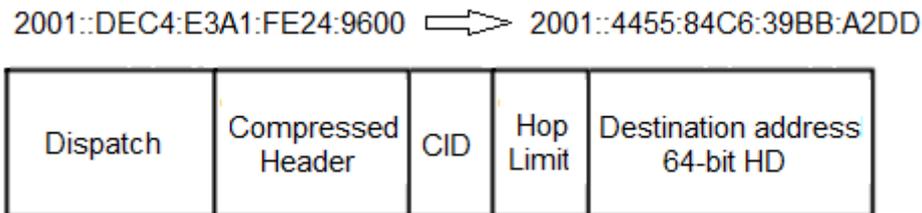
DAC: Destination Address Compression.

DAM: Destination Address Mode.

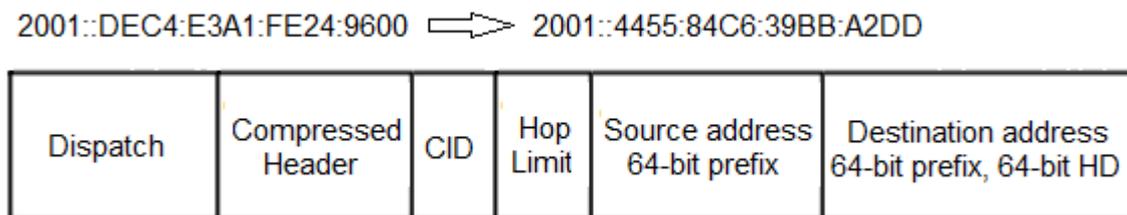
Si la comunicación se realiza entre dos dispositivos que están dentro de la misma red 6LoWPAN, usando la link-local de IPv6 la cabecera puede ser comprimida en 2 bytes [52]



Si la comunicación se realiza a un dispositivo fuera de la red 6LoWPAN y el prefijo de la red externa es conocido, entonces la cabecera IPv6 puede comprimirse a 12 bytes.



Y si la comunicación se realiza a un dispositivo fuera de la red 6LoWPAN pero no se conoce el prefijo de la red externa, entonces la cabecera IPv6 puede comprimirse a 20 bytes



Con el fin de permitir la transmisión de tramas IPv6 a través de IEEE 802.15.4, estas tramas necesitan ser divididas en varios segmentos más pequeños a causas de la gran diferencia de MTU que se explicó en el apartado anterior. Este mecanismo es conocido como Fragmentación.

Para este propósito, se generan datos adicionales en las cabeceras para reensamblar los paquetes en la secuencia correcta en el destino final. Cuando los paquetes son reensamblados, la información adicional añadida se elimina y el paquete fragmentado es restaurado en su formato IPv6 inicial. La secuencia de fragmentación es diferente según el tipo de enrutamiento usado. Esto es, si el enrutamiento se realiza por debajo en el nivel 2, es decir, la capa de enlace, los fragmentos son reensamblados únicamente en el destino. [56]

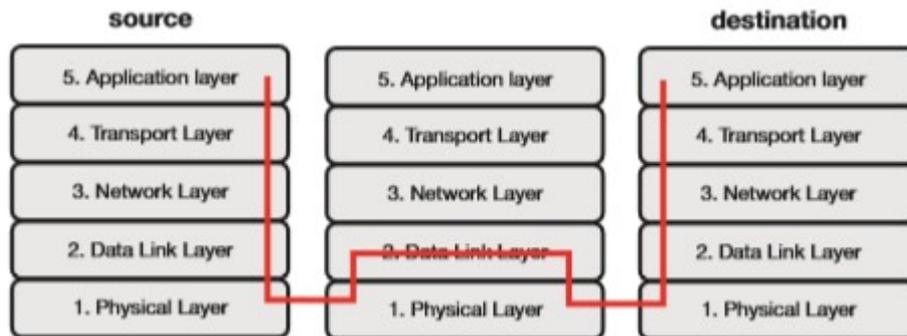


Figura 51: Enrutamiento 6LoWPAN a nivel 2

En cambio, si el enrutamiento se realiza en el nivel 3, es decir, en el nivel de red, los fragmentos son reensamblados en cada salto.

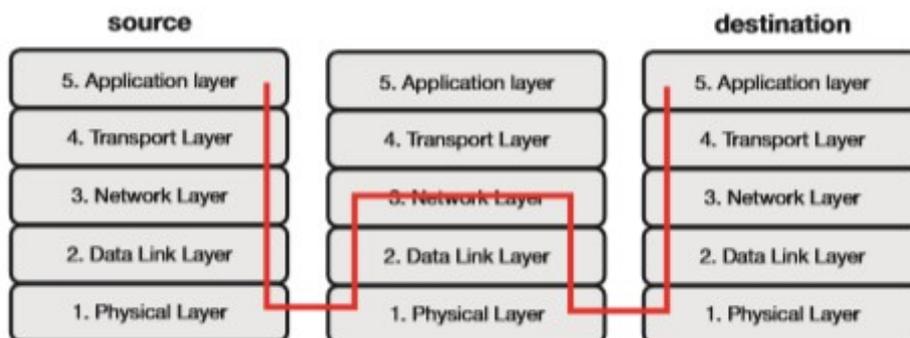


Figura 52: Enrutamiento 6LoWPAN a nivel 3

Así, en una red donde el enrutamiento se realiza en el nivel 3, en cada salto se tienen que tener los recursos suficientes para almacenar todos los fragmentos, mientras que en una red con enrutamiento en el nivel 2 se genera una gran cantidad de tráfico de

red ya que todos los fragmentos se mandan inmediatamente. Si cualquier fragmento falta en una red con enrutamiento en el nivel 2 durante el reensamblado, el paquete completo necesita ser re-transmitido. La fragmentación debe evitarse siempre que sea posible, ya que tiene un impacto negativo en la vida de la batería del dispositivo. Por lo tanto, mantener un *payload* bajo, y usar cabeceras de compresión tiene una máxima importancia.

6LoWPAN utiliza una auto-configuración basada en el protocolo “*Neighbor discovery*” de IPv6. Si un host quiere participar en una red 6LoWPAN, se asigna a sí mismo una dirección unicast de enlace local (FE80::), a continuación, envía esta dirección en un mensaje de “*Neighbor solicitation*” (NS) a todos los demás participantes en la subred para comprobar si se está utilizando la dirección por otra persona. Si no oye un mensaje de “*Neighbor advertisement*” (NA) en un plazo definido, se asume que la dirección es única. Este procedimiento se llama “detección de direcciones duplicadas” (DAD). Entonces, para obtener el prefijo de red, el host envía un mensaje de “*Router solicitation*” (RS) al router para obtener el prefijo correcto. Con el uso de estos mensajes, un host es capaz de asignarse sí mismo una dirección IPv6 única en el mundo.

Usando esta auto-configuración, cada host genera una dirección local IPv6 usando su dirección 802.15.4 EUI-64, una dirección corta de 16 bit, o ambas. En una red mallada 6LoWPAN, la dirección local cubre toda la red mallada y es suficiente para comunicarse dentro de dicha red 6LoWPAN. Una dirección IPv6 enrutable solo sería necesaria para una comunicación fuera de la red 6LoWPAN, por ejemplo una comunicación a Internet fuera de la red 6LoWPAN.

Para direcciones unicast, es más eficiente auto-configurarlas desde la dirección local IEEE EUI-64, ya que permite eliminar la necesidad de resolución de direcciones, lo que da como resultado cabeceras más pequeñas.

8.3. 6LoWPAN con el SoC CC2650

Una vez analizado el funcionamiento básico de 6LoWPAN a través de sus principales RFC's, es momento de ver soluciones comerciales basadas en esta tecnología. En el apartado 6.4.3 se vio que se podía adquirir por el precio de 7.53€ el chip CC2650 de Texas Instruments de manera individual, que ofrecía conexión 802.15.4 con 6LoWPAN. Sin embargo, para una solución totalmente completa, Texas Instruments ofrece un kit de desarrollo por 276€ (\$299 al cambio en la página de Texas Instruments) que consta de una placa equipada con [58]:

- Pantalla LCD de 128x64 pixels
- 4 LEDs
- Soporte de Tarjeta SD
- Acelerómetro digital
- Sensor analógico de luz ambiente
- Depurador XDS100v3
- 2 x SmartRF06EB
- 2 x CC2650 en formato “package 7x7”
- 2 x cables microUSB

Además de toda la documentación necesaria y el software gratuito Contiki OS que ofrece Texas Instruments para la simulación y diseño de sistemas embebidos y que tiene implementado nativamente 6LoWPAN. El diagrama de conexión del paquete CC2650 con encapsulado 7x7, que es el incluido en el kit de desarrollo es el siguiente:

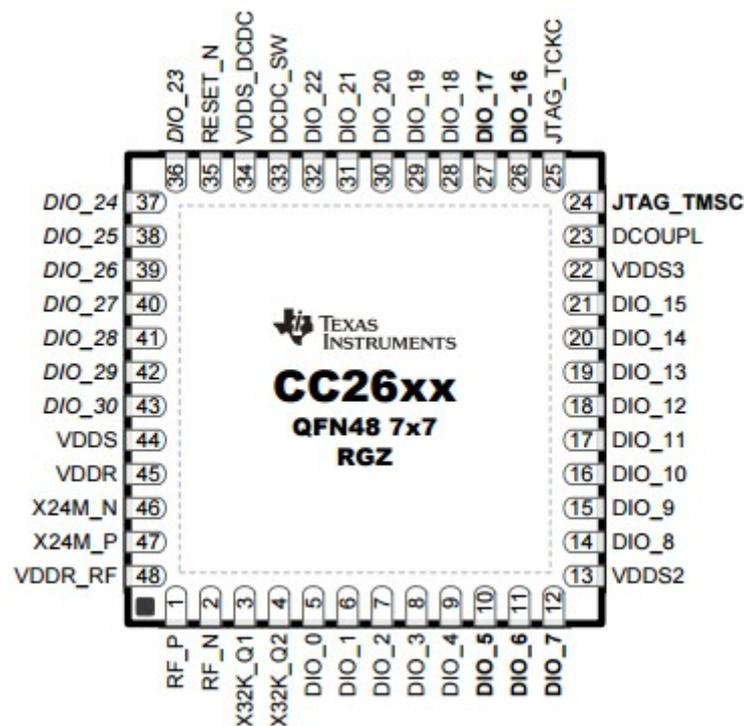


Figura 53: Diagrama de conexión CC2650

Para ver la descripción de cada pin, se debe acudir a la hoja de características ofrecida por Texas Instruments [59] en la sección 4.2 Signal Description – RGZ Package, en la página 7 de la hoja de características, o consultar el “ANEXO 1” de este documento.

En su guía Sensor Tag [60], Texas Instruments ofrece diferentes diagramas de bloques y esquemas para la conexión del SoC CC2650 a diferentes sensores y aplicaciones. Siendo su diagrama de bloques general el siguiente:

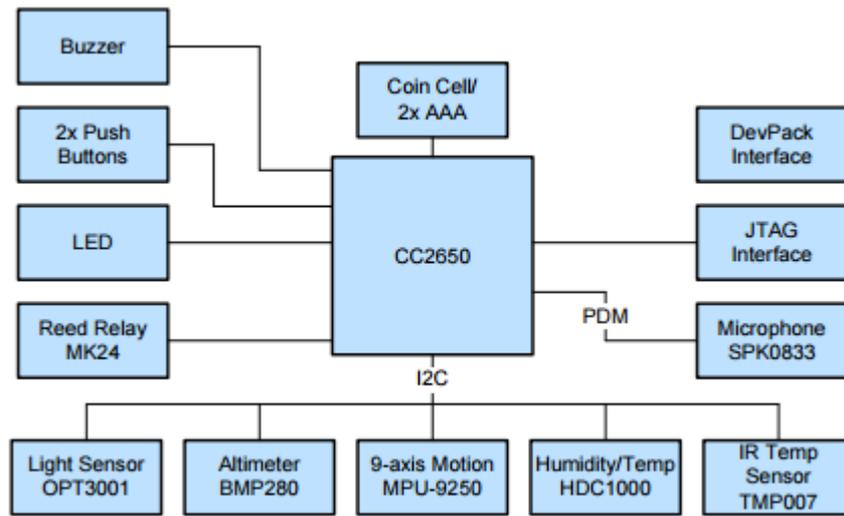


Figura 54: Diagrama de Bloques de conexión CC2650 con sensores

La adaptación de este diagrama de bloques a su correspondiente circuitería se estudiará en el siguiente y último apartado de este estudio.

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez escogida la tecnología inalámbrica y su correspondiente chip a utilizar para la solución de este estudio, se mostrará la pila de protocolos así como la circuitería de dicha solución final.

9.1. Pila de protocolos

Como se vio en la *Figura 48*, basándose en la pila de protocolos TCP/IP se podía adoptar una pila de protocolos propia para 6LoWPAN, quedando la siguiente torre de protocolos.

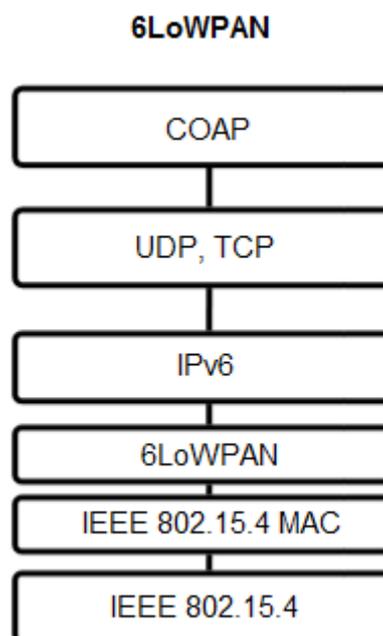


Figura 55: Pila de protocolos 6LoWPAN

En los siguientes apartados, se describe cada una de las capas que conforman esta pila de protocolos, así como su función respecto a la pila de protocolos TCP/IP original.

9.1.1. Capa IEEE 802.15.4

Esta capa, también denominada 802.15.4 PHY, es la equivalente al nivel Físico de la pila de protocolos TCP/IP. Esta capa proporciona una interfaz entre la capa 802.15.4 MAC y el canal de radio [61].

Para llevar a cabo esta labor, esta capa se encarga de las siguientes tareas:

- **Activación y desactivación del transceptor de radio:** Indica el estado en el que se encuentra el transceptor de acuerdo a la petición de la capa 802.15.4 MAC. Estos estados pueden ser “transmitiendo”, “recibiendo” o “reposo”. El tiempo transcurrido entre el cambio de estado “transmitiendo” a “reposo”, y viceversa, no debe ser mayor de 12 periodos de símbolo.
- **Detección de energía por el canal actual:** Realiza una estimación de la potencia de señal recibida por el ancho de banda del canal 802.15.4. El tiempo de estimación de energía debe ser de 8 periodos de símbolo. El resultado de la estimación de energía puede ser utilizada por la capa de red como parte del algoritmo de selección de canal.
- **Indicador de calidad de enlace (LQI) para paquetes recibidos:** La medida LQI se lleva a cabo para cada paquete recibido y sirve para medir la fuerza o la calidad del enlace por el que el paquete ha sido recibido. No obstante, el uso de los resultados LQI por la red o la capa de aplicación no se especifica en el estándar.
- **Evaluación de canal libre (CCA) para la detección de acceso múltiple y prevención de colisiones (CSMA-CA):** La capa 802.15.4 PHY es requerida para llevar a cabo la CCA usando la detección de energía, la detección de portadora o una combinación de ambos. En el modo de detección de energía, el medio se considera ocupado si cualquier energía sobrepasa un umbral de energía predeterminado. En el modo de detección de portadora, el medio se considera ocupado si se detecta una señal con la modulación y características de IEEE 802.15.4. En el modo combinado, ambas condiciones deben comprobarse para determinar que el medio está ocupado.
- **Selección de canal de frecuencia:** Los enlaces inalámbricos 804.15.4 pueden operar en 27 canales diferentes. Por lo tanto, la capa 802.15.4 PHY debe ser capaz de ajustar el transceptor a cierto canal una vez recibida una petición.
- **Transmisión y recepción de datos:** Es la tarea más importante de la capa 802.15.4 PHY. Las técnicas de modulación y propagación son usadas en esta capa en función de la frecuencia utilizada, a saber, 2.4 Ghz, 915 Mhz o 868 Mhz.

9.1.2. Capa IEEE 802.15.4 MAC

Esta capa estaría ubicada junto a la capa de 6LoWPAN en el equivalente al nivel de Enlace de la pila de protocolos TCP/IP. La capa 802.15.4 MAC ofrece la interfaz con la capa IEEE 802.15.4 PHY vista en el apartado anterior. Para ello, esta capa realiza las siguientes tareas [61].

- **Generar balizas (*beacons*) en la red si el dispositivo es un coordinador:** Un coordinador puede mandar balizas periódicamente a la red para sincronizar dispositivos conectados y para otros propósitos.
- **Sincronizar con las balizas:** Un dispositivo conectado a un coordinador con las balizas activadas puede rastrear dichas balizas para sincronizarse con el coordinador. Esta sincronización es importante para el sondeo de datos y el ahorro de energía.
- **Soporte para conexión y desconexión de red de área personal (*PAN*):** Para soportar la auto-configuración, las funciones de conexión y desconexión son embebidas en esta capa 802.15.4 MAC. Esto no permite que la topología en estrella sea configurada automáticamente, pero sí permite la auto-configuración de una red punto a punto.
- **El empleo del mecanismo CSMA-CA para el acceso al canal:** Como muchos otros protocolos diseñados para redes inalámbricas, 802.15.4 usa el mecanismo CSMA-CA para realizar el acceso al canal. Sin embargo, el nuevo estándar no incluye el protocolo RTS/CTS.
- **Manipulación y mantenimiento del mecanismo de tiempo de posición garantizado (*GTS*):** Cuando se está trabajando con las balizas activadas, un coordinador puede asignar porciones activas de la supertrama a los dispositivos. Estas porciones son llamadas GTS y comprenden el periodo libre de contención (CFP) de la supertrama.
- **Proporcionar un enlace fiable entre dos pares de entidades MAC:** La capa 802.15.4 emplea varios mecanismos para mejorar la fiabilidad del enlace entre dos entidades, entre los que se encuentran el reconocimiento y retransmisión de Ack, y la verificación de datos mediante CRC de 16 bits, así como CSMA-CA.

9.1.3. Capa 6LoWPAN

Esta capa formaría, junto a la capa 802.15.4 MAC descrita en el apartado anterior, el nivel de Enlace en la torre de protocolos TCP/IP. En esta capa se produce la interconexión entre 802.15.4 e IPv6 descrito en el apartado 8.2.1 de este estudio.

9.1.4. Capa IPv6

Esta capa corresponde al nivel de Red de la torre de protocolos TCP/IP. Al igual que en TCP/IP, en este nivel se utiliza el protocolo IP, concretamente su versión IPv6, debido a sus características y mejoras respecto a IPv4 explicadas anteriormente en este estudio en el apartado 8.2.1.

9.1.5. Capa UDP/TCP

Esta capa tiene la función de la capa de Transporte en la torre de protocolos TCP/IP. Al ser UDP y TCP protocolos ampliamente conocidos, no se hará un estudio intensivo y solo se muestran sus principales características a continuación [62].

El protocolo de control de transmisión (TCP, *Transmission Control Protocol*) es un protocolo orientado a conexión, por lo que proporciona un servicio confiable para aplicaciones dedicadas al intercambio de información. El estándar del protocolo TCP está definido en la RFC 793. Entre sus principales características destacan:

- Permite el establecimiento de conexiones de transporte entre puertos de diferentes sistemas.
- La conexión se establece mediante el protocolo de Ida-Vuelta-Ida.
- Control de flujo mediante ventana deslizante.
- Separa los datos de las capas superiores y los fragmenta en unidades de 64 Kbytes como máximo denominadas “segmentos”.
- Utiliza temporizadores y retransmisiones.
- Numeración de bytes por *offset*.

Estas características permiten al protocolo TCP proporcionar servicios propios de la capa de Aplicación, pero que consiguen una mayor eficiencia si se desarrollan en la capa de Transporte. Dichos servicios son los siguientes:

- Establecimiento de circuitos virtuales entre aplicaciones.
- Gestión de la entrada/salida de las aplicaciones mediante *buffers*.
- Gestión de la entrada/salida hacia la red a través de paquetes IP, así como su correspondiente ensamblado una vez recibidos.
- Control de flujo a través de los circuitos virtuales y de forma transparente a las aplicaciones.
- Confiabilidad de que cada paquete llegue a su destino o, en su defecto, dar a conocer un posible fallo en la transmisión. Esta confiabilidad se realiza a través de los números de secuencia, contadores, asentimientos y retransmisiones.

El protocolo de datagrama de usuario (UDP, *User Datagram Protocol*) es un protocolo de transporte sin conexión, por lo que proporciona un servicio con baja sobrecarga de cabecera a las aplicaciones que no necesiten o no puedan usar los servicios orientados a conexión de TCP. Estas aplicaciones pueden ser aplicaciones de servicios *broadcast* o aplicaciones para obtención de información y peticiones, donde se necesitan tiempos de respuesta cortos. El estándar del protocolo UDP está definido en la RFC 768, aunque para su correcta implementación se aconseja acudir a la RFC 1122 *Host Network Requirements*.

Entre sus principales características destacan:

- Permite la transmisión de mensajes sin establecimiento de conexión y con una sobrecarga de cabecera muy baja. Pero debido a esto, no ofrece garantía de entrega o secuenciación como si ocurre en TCP.
- Transporta unidades de datos entre los puertos de los sistemas.
- Apropiado para aplicaciones que implementan sus propios controles de errores.

9.1.6. Capa COAP

El protocolo de aplicación restringida (CoAP, *Constrained Application Protocol*), definido en la RFC 7252, es un protocolo de transferencia web para funcionar con recursos muy limitados [63].

El protocolo CoAP funciona sobre UDP y define una capa de mensajes muy simple para retransmitir los paquetes perdidos, ahorrándose el uso del control de congestión propio de TCP. El principal beneficio del protocolo CoAP es que puede ser fácilmente traducido a HTTP e integrar los nodos de la IoT a la Web ya existente. Cuando

el protocolo CoAP se interconecta con HTTP puede aprovechar la estructura REST ya existente en HTTP, ya que en la capa de mensaje del protocolo CoAP se definen los métodos de petición *GET*, *POST*, *PUT* y *DELETE*, que son métodos conocidos y utilizados por el protocolo HTTP.

Entre las principales características del protocolo CoAP [64] destacan:

- Cumplimiento del protocolo WEB con los requisitos de los ambientes M2M.
- Soporte de fiabilidad en peticiones UDP *unicast* y *multicast*.
- Intercambio de mensajes asíncronos.
- Reducción de la complejidad de los mensajes mediante baja sobrecarga de cabeceras.
- Soporte de URI y contenido *Content-Type*.
- Ofrece seguridad mediante DTLS.

El modelo de mensajería en el protocolo CoAP está basado en el intercambio de mensajes UDP entre *host* finales. El mensaje CoAP usa un encabezado binario de 4 bytes y que puede estar seguido de opciones binarias y una carga útil (*payload*). Estos mensajes son compartidos mediante peticiones y respuestas. Cada mensaje contiene un ID con un tamaño de 16 bit y puede haber hasta 250 mensajes por segundo entre los *host* finales. Dicho ID tiene se utiliza para detectar duplicados y proporcionar fiabilidad.

Para conseguir es fiabilidad un mensaje tiene que ser marcado como “Confirmable” (CON). Un mensaje CON es transmitido usando un tiempo de espera predeterminado y un *back-off* exponencial entre retransmisiones, hasta que el receptor envía un mensaje de asentimiento (ACK) con el mismo ID del mensaje.

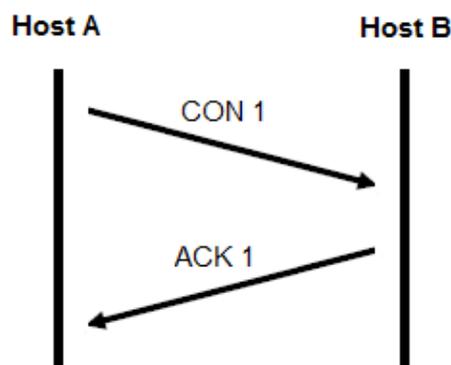


Figura 56: Envío de un mensaje confiable

Si el receptor no puede procesar un mensaje CON, entonces su respuesta será un mensaje Reset (RST) en lugar del asentimiento (ACK).

Un mensaje que no requiere una transmisión confiable puede ser enviado como un mensaje “No Confirmable” (NON), en cuyo caso no se requerirá un asentimiento, pero si se mantendrá el ID del mensaje para evitar duplicados. Cuando un receptor no puede procesar un mensaje NON puede responder con un mensaje RST, pero esto no es obligatorio.

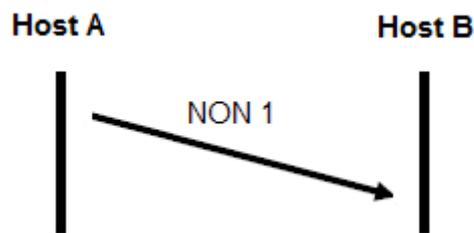


Figura 57: Envío un de mensaje no confiable

Como CoAP funciona sobre UDP, también soporta direcciones de destino IP multicast, permitiendo de este modo peticiones multicast. Además, como se especificó en las características del protocolo CoAP, en su RFC se especifica el uso de DTLS como protocolo de seguridad, y el uso de Ipsec se encuentra ahora mismo en estado de “borrador” en “Using CoAP with Ipsec” [65].

El formato de un mensaje CoAP según se define en la RFC 7252 [60] tiene la siguiente estructura:

0	4	8	16	19	24	31
Ver	T	TKL	Código	Mensaje ID		
Token						
Opciones						
1 1 1 1 1 1 1 1			Payload			

Figura 58: Formato de mensaje CoAP

Los distintos campos del formato de mensaje CoAP se definen de la siguiente manera:

- **Versión (Ver):** Indica el número de versión del protocolo CoAP. Las implementaciones de esta especificación deben tener valor 1 (01 en binario), siendo el resto de valores reservados para un uso futuro. Los mensajes con un campo de versión desconocido deben ser ignorados.
- **Tipo (T):** Indica si el mensaje CoAP es de tipo Confirmable (0), No Confirmable (1), Asentimiento (2) o Reset (3).
- **Longitud Token (TKL):** Indica la longitud del campo Token, que debe ser de 0-8 bytes. Longitudes mayores (9-15 bytes) no deben ser enviadas, y se deben procesar como un mensaje de error.
- **Código:** Con una longitud de 8 bits, los 3 bits más significativos indican la clase, mientras que los 5 bits menos significativos indican los detalles. Este código está documentado en la RFC como "c.dd", siendo "c" un valor entre 0-7 correspondiente a los 3 bits de clase, y siendo "dd" un valor entre 0-31 correspondiente a los 5 bits de detalles. Los bits de clase pueden indicar una petición (0), una respuesta con éxito (2), una respuesta de error de cliente (4) o una respuesta de error de servidor (5).

De esta forma, el registro de los códigos CoAP sería el siguiente:

0.00 → Indica un mensaje vacío.

0.01 – 0.31 → Indica una petición. Por ejemplo, los valores de peticiones de los métodos CoAP serían los siguientes:

Código	Método
0.01	GET
0.02	POST
0.03	PUT
0.04	DELETE

Tabla 16: Códigos Métodos CoAP

1.00 – 1.31 → Reservados.

2.00 – 5.31 → Indica una respuesta. Los valores de estos códigos de respuesta son los siguientes:

Código	Descripción
2.01	Creado
2.02	Borrado
2.03	Válido
2.04	Cambiado
2.05	Contenido
4.00	Petición errónea
4.01	No autorizado
4.02	Opción errónea
4.03	Prohibido
4.04	No encontrado
4.05	Método no permitido
4.12	Pre-condición fallada
4.13	Petición demasiado larga
4.15	Formato de contenido no soportado
5.00	Error de servidor interno
5.01	No implementado
5.02	Puerta de enlace incorrecta
5.03	Servicio no disponible
5.04	Tiempo de espera agotado
5.05	Proxy no soportado

Tabla 17: Códigos de respuesta CoAP

6.00 – 7.31 → Reservado.

- **Mensaje ID:** Se utiliza para detectar la duplicación de mensajes y para asociar mensajes de asentimiento y de *reset* en los mensajes confiables y no confiables, como ya se explicó anteriormente.
- **Token:** Se utiliza para asociar respuestas a las peticiones.
- **Opciones:** CoAP define un número de opciones que pueden ser incluidas en el mensaje. Estas opciones pueden incluirse o no en el mensaje, por lo que si quiere profundizarse en ellas se puede acudir al apartado 3.1 y 3.2 de la RFC 7252.
- **Payload:** Contiene el cuerpo del mensaje o carga útil.

9.2. Interruptor eléctrico IoT

Una vez analizada la torre de protocolos en el apartado anterior, en este apartado se mostrará la circuitería a usar para implementar la solución final con el chip donde se podrá implementar dicha torre de protocolos de *6LoWPAN*.

El esquema eléctrico de un interruptor de luz típico es el siguiente:

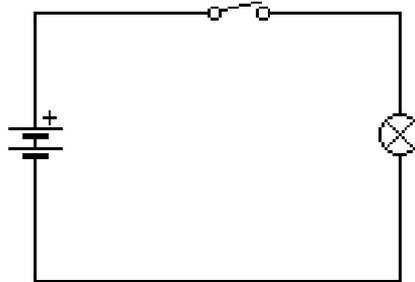


Figura 59: Circuito clásico de un interruptor eléctrico

Para conseguir el propósito del interruptor eléctrico, en esta solución se empleará el uso de sensores, concretamente un sensor de luz.

Como pudo apreciarse en la Figura 55, los distintos sensores se conectan al módulo I2C del SoC CC2650. Para el sensor de luz Texas Instruments tiene en su catálogo de productos el Sensor de Luz Ambiente OPT3001. El sensor OPT3001 mide la intensidad de la luz visible. La respuesta espectral del sensor coincide con la respuesta fotópica del ojo humano e incluye el rechazo de infrarrojos. El diagrama de bloques del sensor OPT 30001 es el siguiente:

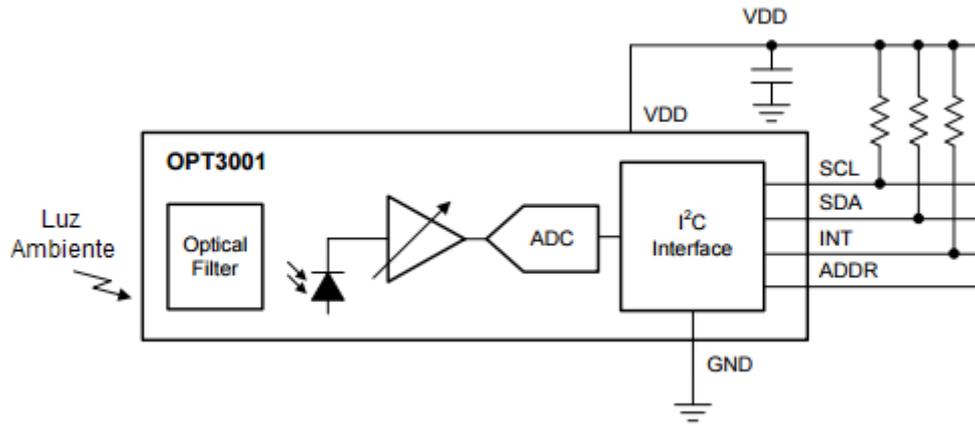


Figura 60: Diagrama de Bloques del sensor de luz OPT3001

Siendo su circuitería la siguiente:

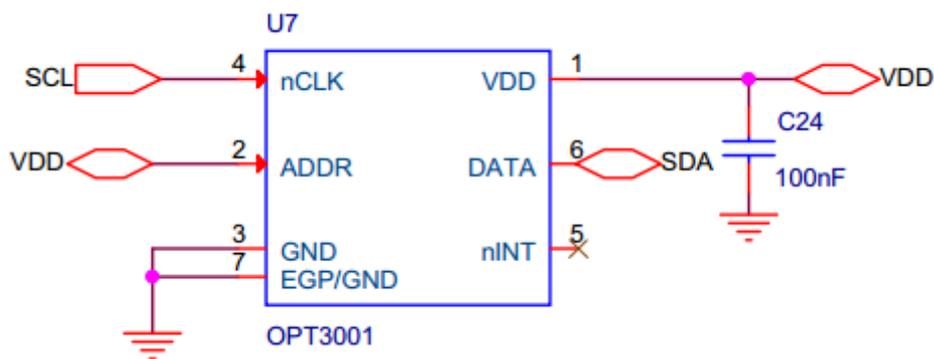


Figura 61: Circuito del sensor de luz OPT3001

Donde, según se especifica en su hoja de características proporcionada por Texas Instruments [66], la función de sus respectivos pines es la siguiente:

- **VDD:** Alimentación del dispositivo, que en este caso, al igual que con el CC2650, se tratará de una pila.
- **ADDR:** Pin de dirección. Este pin configura el LSB de la dirección I2C.
- **GND:** Tierra.
- **SCL:** Establece el reloj de la interfaz I2C.
- **INT:** Interrupción de salida.
- **SDA:** Establece los datos de la interfaz I2C.

De esta forma, la conexión de los pines del sensor de luz OPT3001 con los correspondientes pines del SoC CC2650 sería la siguiente:

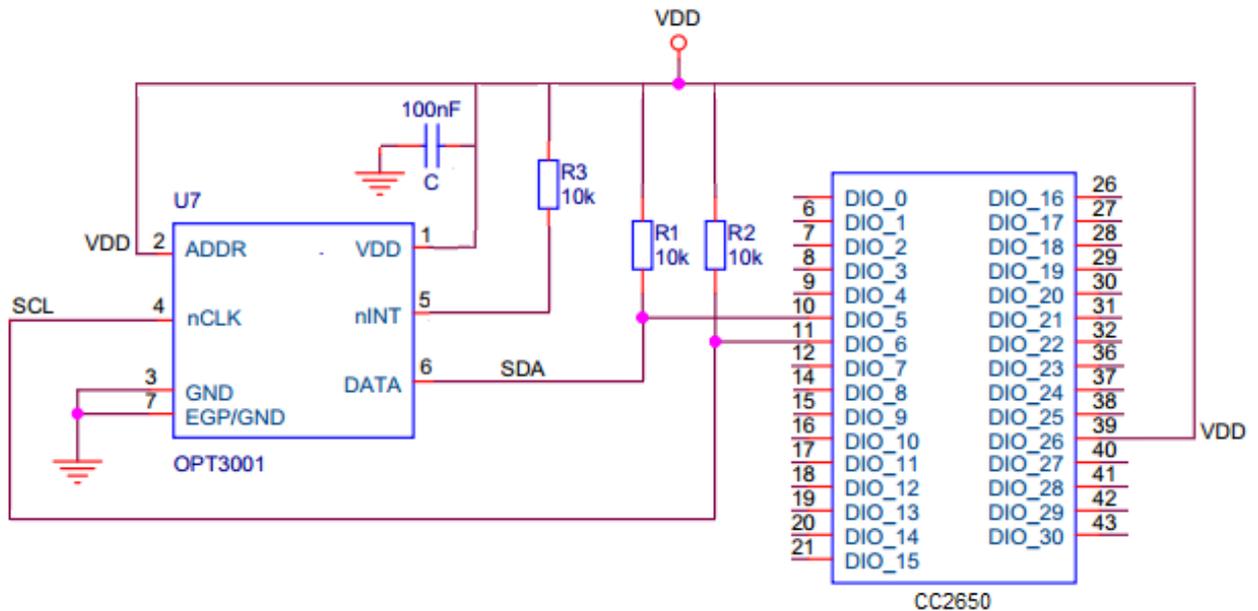


Figura 62: Sensor de luz OPT3001 conectado al CC2650

Los valores de las resistencias R1, R2 y R3 se establecen con un valor de 10k Ω ya que así se indica en la hoja de características del OPT3001. El valor VDD se aconseja que sea en torno a 1.6 – 3.6 V, aunque puede soportar hasta un máximo de 6V.

Una vez adaptado y configurado el sensor de luz, es el turno de acoplar el sistema de iluminación, que en este caso será una bombilla conectada de la siguiente manera al SoC CC2650. Como la bombilla estará conectada a los 220V de la red eléctrica, no se puede conectar directamente al SoC CC2650. Para ello se utilizará un tiristor BT151 conectado al pin 16 del SoC CC2650, correspondiente al pin DIO_10, a la bombilla y a los 220V de corriente alterna, quedando el esquema de circuitería de la siguiente manera:

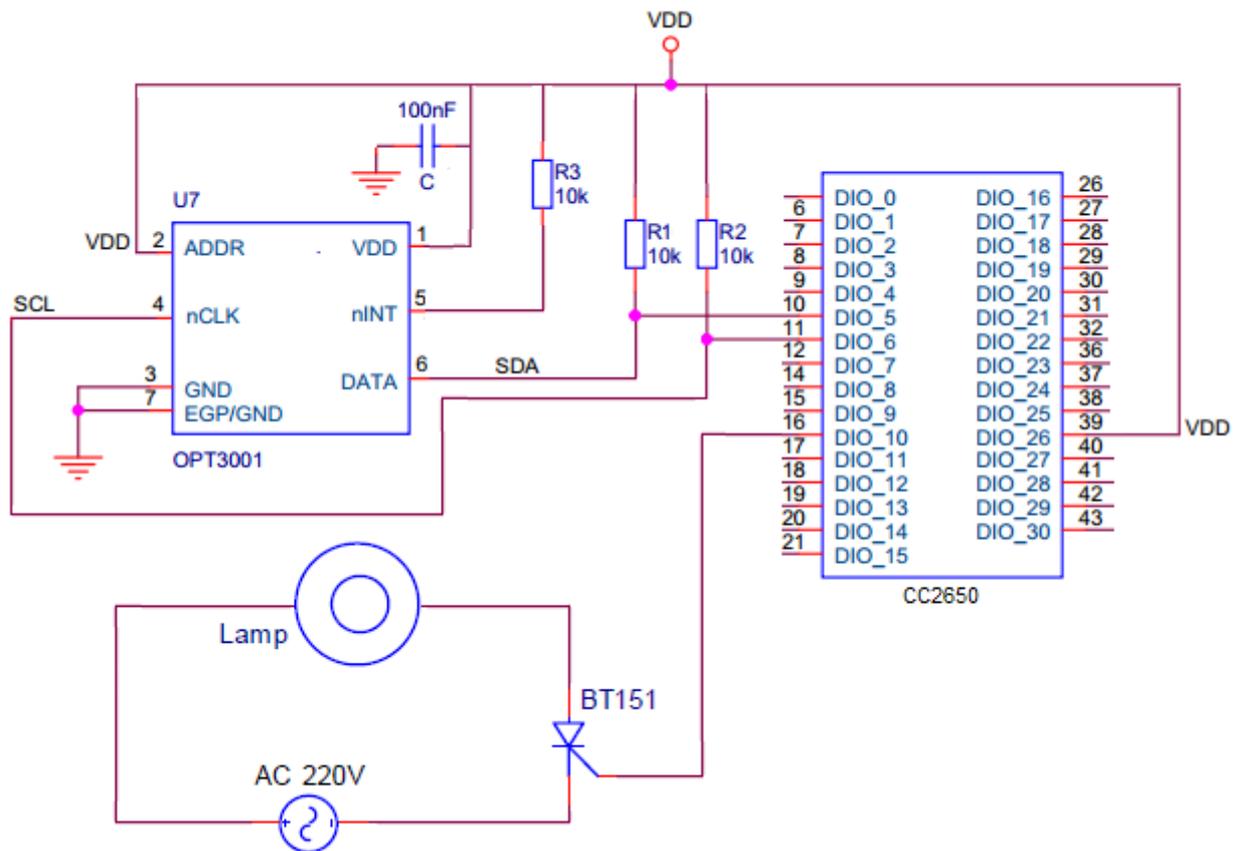


Figura 63: Solución final IoT

El funcionamiento de este tiristor BT151 es el siguiente: su patilla de “puerta” se conecta al pin DIO_10 del CC2650 y sus patillas de ánodo y cátodo se conectan a la bombilla y a la corriente, respectivamente. Cuando la patilla DIO_10 del CC2650 se activa, produce una salida de 1.54V, que según la hoja de características del tiristor BT151 es justo el voltaje que necesita en su “puerta” para activarse, por lo que permitirá el encendido de la bombilla. En cambio, cuando no se produce salida en la patilla DIO_10, la “puerta” del tiristor no tendrá voltaje y por tanto bloqueará el encendido de la lámpara.

En esta solución final, el sensor de luz es el que se encarga de controlar la intensidad lumínica de la habitación, y en función de dicha intensidad, la bombilla se encenderá o se apagará. Al funcionar mediante el SoC CC2650, se puede implementar la pila de protocolos descrita en el apartado 9.1 de este estudio, por lo que se podría controlar la luz mediante una aplicación en el teléfono o mediante una interfaz web

mediante el protocolo HTTP.

En la siguiente tabla, se muestra el desglose económico aproximado de este circuito. Los precios pueden variar según la marca de los componentes, o las respectivas tiendas o distribuidores, pero deben ser aproximados a los que se proporcionan a continuación:

Descripción	Precio unitario	Precio total
SoC Texas Instruments CC2650	7,10 €	7,10 €
Sensor de luz Texas Instruments OPT3001	2,37 €	2,37 €
Tiristor BT151	0,706 €	0,706 €
Pila botón 3V	0,50 € - 1 €	0,50 € - 1 €
Portalámparas	1,75 €	1,75 €
Resistencias (x3)	0,06 €	0,18 €
Condensador 100nF	0,13 €	0,13 €
Mano de obra	15 €	15 €
SUBTOTAL		28,24 €
IVA %		21%
TOTAL		34,17 €

Tabla 18: Presupuesto de la solución final IoT

Así, podemos conseguir una solución para la Internet de las Cosas por el precio de 34,17€ aproximadamente. Como se ha dicho anteriormente, los precios pueden variar en función, por ejemplo, de la pila botón. En este caso, los precios del SoC CC2650, el sensor OPT3001 y el tiristor BT151 se han obtenido del distribuidor *online* www.mouser.es, mientras que los precios del resto de componentes se han obtenido en función de los precios generales en diferentes tiendas online de componentes electrónicos, como www.pilasmabaratas.com o www.brielco.net.

10. CONCLUSIONES

La Internet de las Cosas está llamada a ser la tecnología que va a revolucionar todo en un futuro cercano, pero todavía quedan muchos retos por resolver para hacer realidad esta tecnología. Uno de estos retos, el cual ha sido el principal objeto de estudio en este documento, es la tecnología inalámbrica a utilizar para facilitar la integración del Internet de las Cosas al hogar.

Como se puede comprobar en el estudio de mercado realizado, existen actualmente distintas tecnologías inalámbricas que pueden ser utilizadas en dispositivos de la Internet de las Cosas, cada una con sus pros y sus contras. Algunas son más conocidas de cara al público como son Wi-Fi y Bluetooth. Otras son reconocidas y utilizadas en un sector más específico, como es el caso de ZigBee en el campo de la domótica. Y otras, como 6LoWPAN, están siendo desarrolladas exclusivamente pensando en un futuro con la Internet de las Cosas.

En este estudio se ha llegado a la conclusión de que es esta última, 6LoWPAN, la tecnología inalámbrica más adecuada para la extensión de la Internet de las Cosas al hogar, ya que además de permitir una baja tasa de transferencia así como un consumo bajo de energía, también aprovecha la estructura de red ya existente de IPv6, por lo que facilita la integración a Internet de dispositivos conectados entre sí en los hogares.

No obstante, cada fabricante está intentando implementar su propia solución para la Internet de las Cosas y en muchos casos tratándose de ecosistemas cerrados, como es el caso de Samsung o Google, por lo que pueden surgir nuevos protocolos y tecnologías de comunicación que se adapten a la Internet de las Cosas. O que de mercados ya existentes, como el de la domótica donde ZigBee está bastante implantado, o el de las redes de sensores inalámbricos, donde hay protocolos específicos de enrutamiento como AODV en las VANETs, se reutilicen o modifiquen los protocolos y aplicaciones conocidos para darle solución a la Internet de las Cosas.

En los próximos años también se desarrollará una normativa propia para IoT donde ya se ha visto que están trabajando diferentes organizaciones de estandarización en todo el globo. Además se han visto que existen diferentes iniciativas de futuro como la Estrategia Europea 2020 o el IoT Centre de China, que facilitarán la implementación de la Internet de las Cosas en los hogares, ciudades inteligentes y otros ámbitos.

Además, debido a la reducción de los precios de los chips llamados SoC con una capacidad de computación razonable y conectividad, como se ha podido comprobar en el estudio de mercado, donde hay gran variedad de SoC con un precio de unos pocos euros, y la aparición de placas de bajo coste como Arduino y Raspberry Pi, los desarrolladores disponen de gran facilidad para realizar sus propios proyectos. Esto puede hacer que, a parte de las soluciones “cerradas” que ofrezcan los diferentes fabricantes y empresas, exista una comunidad de código abierto que también ofrezca sus propias soluciones para la Internet de las Cosas, facilitando también de esta forma su evolución.

Por tanto, la Internet de las Cosas es una tecnología con muchos retos aún por delante, pero que parece claro que generará bastante beneficio y movimiento en el mercado. Desde una visión actual, en este estudio se considera que la mejor elección para desarrollar la Internet de las Cosas es el uso de la tecnología 6LoWPAN sobre IEEE802.15.4, con IPv6 como protocolo de red, UDP como protocolo de transporte y el uso del protocolo de aplicación CoAP.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EVANS, Dave. Internet de las cosas. *Cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo*, 2011.
- [2] ASHTON, Kevin. That 'internet of things' thing. *RFID Journal*, 2009, vol. 22, no 7, p. 97-114.
- [3] MCEWEN, Adrian., CASSIMALLY, Hakim. *Internet de las Cosas, la tecnología revolucionaria que todo lo conecta*. Ed. Anaya.
- [4] ZEADALLY, Sherali, et al. Vehicular ad hoc networks (VANETS): status, results, and challenges. *Telecommunication Systems*, 2012, vol. 50, no 4, p. 217-241.
- [5] ZANELLA, Andrea, et al. Internet of things for smart cities. *Internet of Things Journal, IEEE*, 2014, vol. 1, no 1, p. 22-32.
- [6] TELEFÓNICA, Fundación. *Smart Cities: un primer paso hacia la Internet de las Cosas*. Fundación Telefónica, 2011.
- [7] RALLI, Ucendo Carlos., PARDO, Carlos., CABEZAS, Rodríguez Joaquín. Descubre el Piloto de Smartcity IPv6 de Sevilla. 17 de mayo 2016 <<http://blogthinkbig.com/descubre-el-piloto-de-smartcity-ipv6-de-sevilla/>>
- [8] RIVERA, J.; VAN DER MEULEN, R. Gartner's 2014 Hype Cycle for emerging technologies maps the journey to digital business. *Retrieved from <http://www.gartner.com/newsroom/id/2819918> (April 2015)*, 2014.
- [9] CHASE, Jim. The evolution of the internet of things. *Texas Instruments*, 2013.
- [10] AKYILDIZ, Ian F., et al. Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 2002, vol. 38, no 4, p. 393-422.
- [11] AL-KARAKI, Jamal N.; KAMAL, Ahmed E. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. *Wireless communications, IEEE*, 2004, vol. 11, no 6, p. 6-28.
- [12] Asociación Española de Domótica e Inmótica (CEDOM). Disponible en: <<http://www.cedom.es/sobre-domotica/que-es-domotica/>>
- [13] ESCOBAR, Wilken Rodríguez; PINZÓN, Zaira; NARANJO, Pedro. Domótica: Ciencia-ficción hecha realidad. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 2016, vol. 11, p. 59-65.

- [14] DOMÍNGUEZ, Hugo Martín; VACAS, Fernando Sáez. *Domótica: Un enfoque sociotécnico*. Fundación Rogelio Segovia para el desarrollo de las Telecomunicaciones, 2006.
- [15] QUINTANA, Boris; VEGA, Cindy. El factor para dignificar espacios de vivienda social se encuentra en la Domótica. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 2015, no 17.
- [16] REITER, Gil. *Wireless connectivity for the Internet of Things*. Texas Instruments, 2014
- [17] CARRODEAGUAS, Norfi. NorfiPC [Consulta: 6 junio 2016]. Disponible en: <<https://norfipc.com/redes/tipos-redes-estandares-wi-fi-diferencias.php>>
- [18] SANCHEZ-ROSELLY, Francisco Javier. Diapositivas de teoría de la asignatura de Tecnologías de Acceso al Medio. Tema 3. Universidad de Jaén. 2012.
- [19] RUANO, Alonso. Diapositivas de teoría de la asignatura de Redes Basadas en Dispositivos Móviles. Tema 2. Universidad de Jaén. 2014.
- [20] SANCHEZ-ROSELLY, Francisco Javier. Diapositivas de teoría de la asignatura de Tecnologías de Acceso al Medio. Tema 4. Universidad de Jaén. 2012.
- [21] RUANO, Alonso. Diapositivas de teoría de la asignatura de Redes Basadas en Dispositivos Móviles. Tema 2. Universidad de Jaén. 2014.
- [22] MATURANA, Jesús. Muy Computer [Consulta: 6 junio 2016]. Disponible en: <http://www.muycomputer.com/2009/12/18/actualidadnoticiasespecificacion-bluetooth-4-0_we9erk2xxdbc9ddscomtyq3d63qodj4bo3yqsoswvg9gvc7cv-qzigbl5-khmnyjm>
- [23] RUANO, Alonso. Diapositivas de teoría de la asignatura de Redes Basadas en Dispositivos Móviles. Tema 2. Universidad de Jaén.2014
- [24] GONZÁLEZ, Dana Rodríguez. Arquitectura y Gestión de la IoT. *Revista Telem@tica*, 2013, vol. 12, no 3, p. 49-60.
- [25] Club de Informática, robótica y electrónica. Comenzando con ZigBee [Consulta: 6 junio 2016]. Disponible en: <<http://webdelcire.com/wordpress/archives/1714>>

[26] Domodesk. A fondo ZigBee [Consulta: 6 junio 2016]. Disponible en: <<http://www.domodesk.com/a-fondo-zigbee>>

[27] GUERRERO MORENO, Fabio Germán; BARANDICA LOPEZ, Asfur. *Sistemas de monitoreo de eventos aplicando el protocolo 6 lowpan [recurso electrónico]*. 2015. Tesis Doctoral.

[28] PENALVA, Javier. *NFC: Qué es y para qué sirve*. Xataka [Consulta: 6 junio 2016]. Disponible en: <<http://www.xataka.com/moviles/nfc-que-es-y-para-que-sirve>>

[29] CCM. Ethernet. Ccm.net [Consulta: 6 junio 2016]. Disponible en: <<http://es.ccm.net/contents/672-ethernet>>

[30] SANCHEZ-ROSELLY, Francisco Javier. Diapositivas de teoría de la asignatura Tecnologías de Acceso al Medio. Tema 2. Universidad de Jaén. 2012.

[31] CCM. La tecnología PLC. Ccm.net [Consulta: 6 junio 2016]. Disponible en: <<http://es.ccm.net/faq/3295-la-tecnologia-plc>>

[32] EKOPLC [Consulta: 6 junio 2016]. Características de la tecnología. Disponible en: <<http://www.ekoplpc.net/caracteristicas-plc/index.htm>>

[33] HEVIA, Andrés. PLC o cómo navegar por Internet a través de los enchufes (II): instalación del PLC y comparativa con el WIFI en el acceso a Internet. Xataka On [Consulta: 6 junio 2016]. Disponible en: <<http://www.xatakaon.com/equipos-de-red/plc-o-como-navegar-por-internet-a-traves-de-los-enchufes-ii-instalacion-del-plc-y-comparativa-con-el-wifi-en-el-acceso-a-internet>>

[34] RODRÍGUEZ, Paco. Redes PLC (I): Qué son y para qué sirven. Xataka Home [Consulta: 6 junio 2016]. Disponible en: <<http://www.xatakahome.com/la-red-local/redes-plc-i-que-son-y-para-que-sirven>>

[35] CCS, Ingeniería. KNX [Consulta: 6 junio 2016]. Disponible en: <<http://www.ccsingenieria.es/knx>>

[36] National KNX Spain. [Consulta: 6 junio 2016]. Disponible en: <<http://www.knx.org/es/knx/tecnologia/introduccion/index.php>>

[37] BERDEJO, Mónica. ¿Qué es KNX?. Blog SEAS [Consulta: 6 junio 2016]. Disponible en: <<http://www.seas.es/blog/automatizacion/que-es-knx/>>

[38] Microsoft. Windows IoT. Get Started [Consulta: 6 junio 2016]. Disponible en: <<http://ms-iot.github.io/content/en-US/GetStarted.htm>>

[39] PASTOR, Javier. Llega Windows 10 for IoT Core: Microsoft, a por la Internet de las Cosas. Xataka [Consulta: 6 junio 2016]. Disponible en: <<http://www.xataka.com/robotica-e-ia/llega-windows-10-for-iot-core-microsoft-a-por-la-internet-de-las-cosas>>

[40] Google I/O for developers. Main. Disponible en: <<https://events.google.com/io2015/>>

[41] Brillo. Google developers. Disponible en: <<https://developers.google.com/brillo/>>

[42] GONZÁLEZ, María. Brillo: así es el sistema operativo de Google para la Internet de las Cosas. Xataka [Consulta: 6 junio 2016]. También disponible en: <<http://www.xataka.com/internet-of-things/brillo-asi-es-el-sistema-operativo-de-google-para-el-internet-de-las-cosas>>

[43] Página oficial del evento IFA. Disponible en: <<http://www.ifa-berlin.de/en/>>

[44] PÉREZ, Enrique. SmartThings, la solución para el Internet de las Cosas de Samsung. El android libre [Consulta: 6 junio 2016]. Disponible en: <<http://www.elandroidelibre.com/2015/09/smarthings-la-solucion-para-el-internet-de-las-cosas-de-samsung.html>>

[45] PASTOR, Javier. Más domótica en tu hogar: las nuevas SmartThings de Samsung llegarán en septiembre. Xataka [Consulta: 6 junio 2016] Disponible en: <<http://www.xataka.com/domotica-1/mas-domotica-en-tu-hogar-las-nuevas-smarthings-de-samsung-llegaran-en-septiembre>>

[46] Boletín oficial del Estado. Real Decreto 346/2011. Anexo 5 Hogar Digital, pag 124. Disponible en: <<https://www.boe.es/boe/dias/2011/04/01/pdfs/BOE-A-2011-5834.pdf>>

[47] ASIMELEC. Guía del usuario del hogar digital. También disponible en: <http://www.ramonmillan.com/documentos/bibliografia/GuiaHogarDigital_ASIMELEC.pdf>

[48] Comisión Europea. Europa 2020: La estrategia europea de crecimiento. Disponible en: <<http://www.lamoncloa.gob.es/espana/eh15/politicassocial/Documents/Europa-2020-la-estrategia-europea-de-crecimientoA.pdf>>

[49] PASCUAL, Juan Antonio. Internet de las Cosas creará 4.5 millones de empleos en 2020. Computer hoy [Consulta 6 junio 2016]. También disponible en: <<http://computerhoy.com/noticias/software/internet-cosas-creara-45-millones-empleos-2020-15157>>

[50] JIMENEZ, Marimar. España, entre los países peor preparados para aprovechar el tirón del Internet de las Cosas. El País [Consulta: 6 junio 2016]. Disponible en: <http://elpais.com/eventos/2015/01/30/mwc/1422613344_400980.html>

[51] MCGUINNESS, Matthew. Industrial Internet of Things Will Boost Economic Growth, but Greater Government and Business Action Needed to Fulfill its Potential, Finds Accenture. Accenture [Consulta: 6 junio 2016]. También disponible en: <<https://newsroom.accenture.com/news/industrial-internet-of-things-will-boost-economic-growth-but-greater-government-and-business-action-needed-to-fulfill-its-potential-finds-accenture.htm>>

[52] AIOTI. Alliance For Internet Of Things Innovation. También disponible en: <<http://www.aioti.eu/>>

[53] KATUSIC, Damjan, et al. Market, standardization, and regulation development in machine-to-machine communications. En *Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2012 20th International Conference on*. IEEE, 2012. p. 1-7.

[54] CHEN, Shanzhi, et al. A vision of IoT: Applications, challenges, and opportunities with china perspective. *Internet of Things Journal, IEEE*, 2014, vol. 1, no 4, p. 349-359.

[55] GSMA. How China is scaling The Internet of Things. An insight report from the GSMA Connected Living Programme. July 2015, p. 8.

[56] OLSSON, Jonas. 6LoWPAN demystified. Texas Instruments, 2014.

[57] VADILLO GUTIÉRREZ, Óscar. Provisión de servicios de la Internet de las Cosas sobre redes de sensores basadas en 6LoWPAN. Universidad de Cantabria. p.21

[58] Texas Instruments. CC2650 Smart RF06 Development Kit [Consulta: 6 junio 2016]. Disponible en: <<http://www.ti.com/tool/cc2650dk#1>>

[59] Texas Instruments. CC2650 SimpleLink Multistandard Wireless MCU (Rev. A) Datasheet. También disponible en: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2650.pdf>>

[60] Texas Instruments. Multi-Standard CC2650 Sensor Tag Design Guide. TI Designs. También disponible en: <<http://www.ti.com/lit/ug/tidu862/tidu862.pdf>>

[61] ZHENG, Jianliang; LEE, Myung J. A comprehensive performance study of IEEE 802.15. 4. 2004.

[62] CUEVAS MARTÍNEZ, Juan Carlos. Diapositivas de teoría de la asignatura Protocolos de Transporte. Tema 3. Universidad de Jaén. 2013

[63] PINTO, Alejandro Cama; DE LA HOZ FRANCO, Emiro; PINTO, Dora Cama. Las redes de sensores inalámbricos y el Internet de las cosas. *INGE CUC*, 2012, vol. 8, no 1, p. 163-172.

[64] SHELBY, Zach; HARTKE, Klaus; BORMANN, Carsten. The constrained application protocol (CoAP). 2014.

[65] BORMANN, Carsten. Using CoAP with IPsec. 2012.

[66] Texas Instruments. OPT3001 Ambient Light Sensor Datasheet. Disponible en: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opt3001.pdf>>

GLOSARIO DE TÉRMINOS

- **IoT:** Internet of Things. Internet de las Cosas.
- **VLSI:** Very Large Scale Integration
- **SoC:** System on a Chip. Sistema en un chip.
- **IoE:** Internet of Everything.
- **MIT:** Instituto Tecnológico de Massachusetts.
- **WSN:** Wireless Sensor Network.
- **CEDOM:** Asociación Española de Domótica e Inmótica.
- **ITU:** Unión Internacional de Telecomunicaciones.
- **PAN:** Personal Area Network.
- **WPAN:** Wireless Personal Area Network.
- **LAN:** Local Area Network.
- **WLAN:** Wireless Local Area Network.
- **NAN:** Neighborhood Area Network.
- **WAN:** Wide Area Network.
- **IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- **OSI:** Modelo Open System Interconnection.
- **Mbps:** Megabit por segundo.
- **Kbps:** Kilobit por segundo.
- **UMTS:** Universal Mobile Telecommunications System.
- **ISM:** Banda de frecuencias para uso Industrial, Científico y Médico.
- **6LoWPAN:** IPv6 Over Low Power Wireless Personal Area Network.
- **RFC:** Request for Comments.
- **IETF:** Internet Engineering Task Force.
- **Mah:** Miliamperio por hora.

- **P2P:** Peer to Peer.
- **MAC:** Media Access Control.
- **PLC:** Power Line Communications.
- **ADSL:** Línea de abonado digital asimétrica.
- **TCP/IP:** Modelo de protocolo de red basado en TCP e IP.
- **TLS:** Seguridad en la capa de transporte.
- **MCU:** Microcontrolador.
- **ARM:** Tipo de arquitectura para ordenadores con conjunto reducido de instrucciones.
- **UART:** Transmisor-Receptor Asíncrono Universal.
- **SPI:** Bus de Interfaz de Periféricos.
- **SDIO:** Ranura de entrada/salida digital segura.
- **QFN:** Formato de encapsulado “quad-flat no-leads”
- **CMOS:** Familia lógica de los circuitos integrados.
- **WEP:** Wired Equivalent Privacy. Privacidad Equivalente a Cableado.
- **WPA:** Wi-Fi Protected Access. Acceso Wi-Fi Protegido.
- **SSL:** Capa de Conexión Segura.
- **DNS:** Sistema de nombres de dominio.
- **DHCP:** Dynamic Host Configuration Protocol.
- **RTC:** Real-Time Clock.
- **LGA:** Formato de encapsulado “Land Grid Array”
- **PCB:** Placa de circuito impreso.
- **ROM:** Memoria de solo lectura.
- **RAM:** Memoria de acceso aleatoria.
- **AES:** Advanced Encryption Standard.
- **RSA:** Algoritmo criptográfico de clave pública.
- **GPIO:** Entrada/Salida de propósito general.

- **AVR:** Familia de microcontroladores de instrucciones reducidas del fabricante Atmel.
- **PWN:** Pulse-width modulation.
- **ADC:** Conversor analógico digital.
- **MBTS:** Instalaciones de baja tensión de seguridad.
- **MBTP:** Instalaciones de baja tensión de protección.
- **MBTF:** Instalaciones de baja tensión funcionales.
- **MTU:** Unidad máxima de transferencia.
- **LQI:** Link Quality Indication.
- **CCA:** Clear Channel Assessment.
- **CSMA-CA:** Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance.
- **RTS/CTS:** Request To Send / Clear To Send.
- **GTS:** Guaranteed Time Slot.
- **CFP:** Contention Free Slot.
- **CRC:** Verificación por redundancia cíclica.
- **M2M:** Machine to Machine.
- **DTLS:** Datagram Transport Layer Security.
- **URI:** Uniform Resource Identifier.

ANEXO 1. DESCRIPCIÓN DE PINES DEL SOC CC2650

Nombre	No	Tipo	Descripción
DCDC_SW	33	Power	Output from internal DC-DC
DCOUPPL	22	Power	1.27 V regulated digital-supply
DIO_0	5	Digital I/O	GPIO, sensor controller
DIO_1	6	Digital I/O	GPIO, sensor controller
DIO_2	7	Digital I/O	GPIO, sensor controller
DIO_3	8	Digital I/O	GPIO, sensor controller
DIO_4	9	Digital I/O	GPIO, sensor controller
DIO_5	10	Digital I/O	GPIO, sensor controller, high-drive
DIO_6	11	Digital I/O	GPIO, sensor controller, high-drive
DIO_7	12	Digital I/O	GPIO, sensor controller, high-drive
DIO_8	14	Digital I/O	GPIO
DIO_9	15	Digital I/O	GPIO
DIO_10	16	Digital I/O	GPIO
DIO_11	17	Digital I/O	GPIO
DIO_12	18	Digital I/O	GPIO
DIO_13	19	Digital I/O	GPIO
DIO_14	20	Digital I/O	GPIO
DIO_15	21	Digital I/O	GPIO
DIO_16	26	Digital I/O	GPIO, JTAG_TDO
DIO_17	27	Digital I/O	GPIO, JTAG_TDI
DIO_18	28	Digital I/O	GPIO
DIO_19	29	Digital I/O	GPIO
DIO_20	30	Digital I/O	GPIO
DIO_21	31	Digital I/O	GPIO
DIO_22	32	Digital I/O	GPIO
DIO_23	36	Digital/Analog I/O	GPIO, sensor controller, Analog
DIO_24	37	Digital/Analog I/O	GPIO, sensor controller, Analog
DIO_25	38	Digital/Analog I/O	GPIO, sensor controller, Analog
DIO_26	39	Digital/Analog I/O	GPIO, sensor controller, Analog
DIO_27	40	Digital/Analog I/O	GPIO, sensor controller, Analog
DIO_28	41	Digital/Analog I/O	GPIO, sensor controller, Analog
DIO_29	42	Digital/Analog I/O	GPIO, sensor controller, Analog
DIO_30	43	Digital/Analog I/O	GPIO, sensor controller, Analog

JTAG_TMSC	24	Digital I/O	JTAG_TMSC, high-drive
JTAG_TCKC	25	Digital I/O	JTAG_TCKC
RESET_N	35	Digital input	Reset, active-low
RF_P	1	RF I/O	Positive RF input signal to LNA during RX Positive RF output signal to PA during TX
RF_N	2	RF I/O	Negative RF input signal to LNA during RX Negative RF output signal to PA during TX
VDDR	45	Power	1.7 V to 1.95 V supply
VDDR_RF	48	Power	1.7 V to 1.95 V supply
VDDS	44	Power	1.8 V to 3.8 V main chip supply
VDDS2	13	Power	1.8 V to 3.8 V DIO supply
VDDS3	22	Power	1.8 V to 3.8 V DIO supply
VDDS_DCDC	34	Power	1.8 V to 3.8 V DC-DC supply
X32K-Q1	3	Analog I/O	32-kHz crystal oscillator pin 1
X32K-Q2	4	Analog I/O	32-kHz crystal oscillator pin 2
X24M_N	46	Analog I/O	24-MHz crystal oscillator pin 1
X24M_P	47	Analog I/O	24-MHz crystal oscillator pin 2
EGP		Power	Ground

