

UOC – URL

# **IoT: TECNOLOGÍAS, usos, tendencias y desarrollo futuro.**

Trabajo Fin de Master en Ingeniería de Telecomunicación.

David Bliznakoff del Valle  
06/11/2014



## Tabla de contenido

|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| Introducción .....                             | 4  |
| ¿Qué es Internet Of Things? .....              | 4  |
| Objetivos del Proyecto .....                   | 5  |
| Breve repaso a la historia de <b>IoT</b> ..... | 5  |
| Ámbitos de aplicación <b>IoT</b> .....         | 7  |
| Medioambiente.....                             | 8  |
| Industria .....                                | 9  |
| Ciudades.....                                  | 10 |
| Hogar .....                                    | 11 |
| Personal.....                                  | 11 |
| Tecnologías de comunicaciones <b>IoT</b> ..... | 13 |
| Tecnologías WAN .....                          | 15 |
| 4G/LTE .....                                   | 15 |
| 3G.....                                        | 16 |
| 2G/GPRS/EDGE/GSM.....                          | 17 |
| Tecnologías MAN.....                           | 17 |
| Weightless .....                               | 17 |
| Wimax .....                                    | 18 |
| Dash7 .....                                    | 20 |
| ENOCEAN.....                                   | 21 |
| PLC .....                                      | 22 |
| Ethernet.....                                  | 23 |
| Tecnologías LAN/PAN .....                      | 24 |
| WIFI.....                                      | 24 |
| IEEE 802.15.14.....                            | 25 |
| Z-WAVE.....                                    | 25 |
| ZIGBEE .....                                   | 26 |
| BLUETOOTH.....                                 | 28 |
| ANT / ANT + .....                              | 29 |
| RFID .....                                     | 30 |
| NFC.....                                       | 30 |
| Estado del Arte <b>IoT</b> .....               | 31 |
| Tecnología IEE 802.15.4 y sus evoluciones..... | 36 |
| Física y enlace de datos.....                  | 37 |

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| Coordinated Sampled Listening (CSL).....      | 39 |
| Receiver Initiated Transmission (RIT).....    | 40 |
| TimeSlotted Channel Hopping (TSCH).....       | 41 |
| Red.....                                      | 43 |
| 6LoWPAN.....                                  | 43 |
| RPL.....                                      | 46 |
| 6TiSCH.....                                   | 48 |
| Aplicaciones.....                             | 48 |
| Message Queue Telemetry Transport (MQTT)..... | 49 |
| Constrained Application Protocol (CoAP).....  | 50 |
| Tecnologías para IEEE 802.15.4.....           | 51 |
| Hardware.....                                 | 52 |
| TelosB.....                                   | 52 |
| Z1 de Zolertia.....                           | 53 |
| OpenMote-CC2538.....                          | 54 |
| @ANY de Adaptative Network Solutions.....     | 55 |
| Software.....                                 | 56 |
| Contiki.....                                  | 57 |
| OpenWSN.....                                  | 59 |
| RIoT.....                                     | 61 |
| Conclusiones.....                             | 63 |
| ANEXO.....                                    | 66 |
| Tabla de Ilustraciones.....                   | 67 |
| Bibliografía.....                             | 69 |

## Introducción

### ¿Qué es Internet Of Things?

La traducción literal del término *Internet Of Things* (a partir de ahora **IoT**) se corresponde con la expresión “*Internet de las cosas*”, sin embargo esta traducción es a todas luces insuficiente para definir la magnitud y complejidad que encierra esta tecnología. El Cluster of European Research Projects (IERC, 2009) definió **IoT** en su *Strategic Research Roadmap* como: “*una infraestructura de red global y dinámica con capacidad de auto configuración basada en protocolos de comunicación estandarizados e interoperables donde las **cosas** (things) físicas y virtuales tienen identidades, atributos físicos, personalidad virtual, y haciendo uso de interfaces inteligentes se integran perfectamente en la red de información*”.

Esta definición es una de las múltiples que existen en la actualidad, ya que no hay a día de hoy una definición “común” que esté universalmente aceptada. Gran parte de la problemática surge de la velocidad de transformación de esta tecnología que se encuentra todavía en expansión, aumentado con el paso del tiempo sus ámbitos de aplicación y usos. Esto queda demostrado claramente si se repasa brevemente su historia.

Varios personajes a la largo del siglo pasado fueron capaces de prever (antes incluso del surgimiento de Internet) la aparición de objetos inteligentes y capaces de comunicarse entre sí. El inventor Nicola Tesla (Tesla, 1926) comentó:

*“ Cuando el concepto de Inalámbrico sea perfectamente aplicado, la tierra entera estará cubierta de un enorme cerebro, siendo todas las cosas partículas de un todo.....y los instrumentos a través de los cuales seremos capaces de hacer esto serán increíblemente simples comparados con nuestro teléfono actual. Una persona será capaz de llevar uno guardado en su bolsillo”*

También antes de la aparición incluso de Internet Jay B. Nash (Nash, 1934) escribió:

*“Tenemos al alcance de la mano la comodidad de los ciudadanos de la antigua Grecia, hecho posible gracias a nuestros esclavos mecánicos, que sobrepasan en número ampliamente la relación de 12 esclavos por hombre libre de aquellos.... A medida que entramos en una habitación y tocamos un botón una docena de luces iluminan nuestro camino. Otro esclavo se encuentra sentado en nuestro termostato, regulando la calefacción. Otro más se sienta día y noche en nuestro refrigerados automático. Enciende nuestro coche, hace mover nuestros motores, da lustre a nuestros zapatos.....”*

Todos estos visionarios no consiguieron prever aun así el alcance y magnitud de lo que hoy es una realidad. Siguiendo un orden cronológico podríamos comenzar los orígenes de **IoT** cuando se inventaron los códigos de barras, ya que podríamos decir que fue el primer intento de catalogar las cosas con un id único. A partir de ese

momento y junto al avance de internet los *wearables* fueron ganando terreno y los autómatas evolucionando de tal manera que en el año 2009 existían más de 6 billones de dispositivos, es decir, más dispositivos conectados a la red que seres humanos habitando el planeta.

## Objetivos del Proyecto

Se han realizado diversos estudios sobre el posible impacto económico y social del desarrollo de **IoT** en el medio plazo siendo los resultados de dichos proyectos lo que han motivado en gran medida la realización de este proyecto. La gran mayoría de grandes compañías mundiales prevén unos ingresos gracias a **IoT** en el año 2020 de un trillón de dólares, y más de 50 billones de dispositivos conectados.

Estos datos macro-económicos hacen que parezca lógico realizar un análisis sobre el estado actual de **IoT**, con una primera fase en la cual se deben identificar los campos de aplicación actual y cuáles son las tecnologías en uso, para a partir de esos datos, tratar de discernir cuáles de esas tecnologías pueden ofrecer una mayor proyección de futuro, ya sea por sus posibles aplicaciones o por su impacto en el desarrollo de la tecnología.

Una vez determinadas dichas tecnologías se pretende seleccionar la tecnología más prometedora dependiendo de los mercados futuros y se realizará un análisis exhaustivo en cuanto a sus protocolos, hardware y software determinando en cada momento las plataformas y tecnologías más vanguardistas que puedan impulsar aún más el desarrollo de **IoT**.

Por último en las conclusiones se pretende ofrecer un resumen con los objetivos del proyecto resueltos indicando las tecnologías, proyectos y plataformas más prometedoras, así como el trabajo futuro a realizar.

## Breve repaso a la historia de IoT

Cronología (Press, 2010) (Postscapes, 2013):

- **1949:** *Se inventa el código de barras (que posteriormente evolucionaría para su uso en supermercados).*
- **1960:** *Morton Heilig recibe la patente para el primer dispositivo montado en la cabeza (head-up wearable).*
- **1969:** *El primer gran momento, se envía el primer mensaje a través de ARPANET (el precursor de internet).*

- **1973:** Se otorga la primera patente para un lector/escritor RFID pasivo.
- **1980:** Miembros del departamento de Ciencias de Computación de Carnegie-Mellon consiguen instalar micro-switches en una máquina de venta de refrescos y conectarla al ordenador del departamento para poder comprobar desde la terminal el número de botellas que quedan y si están frías o no.
- **1990:** Olivetti desarrolla un sistema de localización mediante etiquetas e infrarojos que permite comunicar la posición de una persona dentro de un edificio a un centro de control.
- **1993:** Un proyecto de la universidad de Columbia denominado KARMA diseña un head-up de realidad aumentada con capacidad de sobreponer los planos y las instrucciones de mantenimiento a los objetos.
- **1994:** Steve Mann desarrolla la primera webcam inalámbrica y equipable.
- **1995:** Siemens establece un departamento dedicado dentro de su negocio de teléfonos móviles para desarrollar y lanzar un módulo GSM para aplicaciones máquina a máquina (machine-to-machine M2M).
- **1997:** Tiene lugar en Cambridge (USA) el primer simposio internacional del IEEE sobre “wearable computers”.
- **1999:** Kevin Ashton hace referencia por primera vez al término “IoT” en una presentación para P&G.
- **2000:** LG anuncia su primera nevera conectada a Internet.
- **2003-2004:** El termino **IoT** es ampliamente usado en publicaciones de primer orden.
- **2005:** la **ITU** publica su primer informe sobre **IoT**.
- **2005:** Nace Arduino, una plataforma fácil de usar y de bajo coste para desarrollo de aplicaciones.
- **2006-2008:** **IoT** recibe reconocimiento por parte de EU.
- **2008-2009:** Nace finalmente **IoT** al superar el número de dispositivos conectados al número de seres humanos.

Según Cisco Internet Business Solutions Group el nacimiento de esta tecnología se produjo entre los años 2008 y 2009 cuando el número de “objetos o cosas” conectados a la red superó al número de seres humanos en la tierra. Desde entonces el número de dispositivos y tecnologías asociadas a ellos no han hecho más

que crecer, llegando al punto en el que solo en el año 2014 se han producido dos mil millones de dispositivos conectados a internet (excluyendo teléfonos móviles) con unos beneficios empresariales gracias a IoT cifrados en 0.2 billones de dólares (*harbor research*). Estos números ofrecen una idea de la enormidad que engloba el término IoT.

## Ámbitos de aplicación IoT

Una vez definido el término IoT y comentado brevemente su historia es necesario concretar las aplicaciones que pueden desarrollarse mediante esta tecnología. Tal y como se puede observar en la imagen inferior (Paulantonio, 2012) los ámbitos de aplicación cubren prácticamente todas las facetas de la vida diaria, desde la salud pasando por fabricación, seguridad, ciudades inteligentes y un largo etcétera.

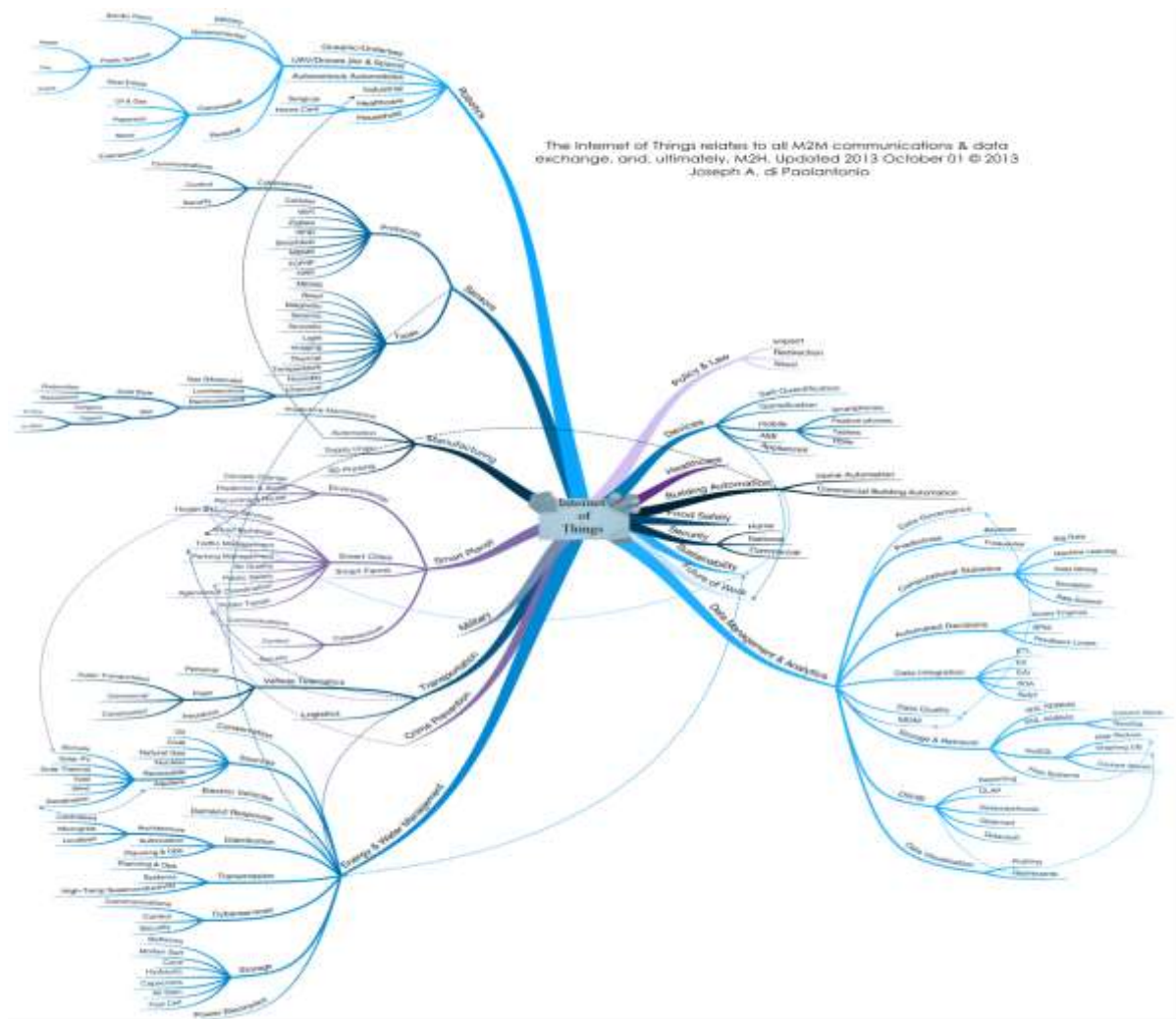


Ilustración 1: Mapa de ámbitos de aplicaciones de IoT.



El alcance masivo de esta tecnología hace que realizar un análisis exhaustivo de los ámbitos de aplicación quede fuera de los objetivos del presente documento, por lo tanto se tomará una división más simple para dar una idea general sobre las capacidades en cada ámbito.

Por simplicidad se tomarán 5 grandes ámbitos básicos de aplicación:

- Medio-ambiente.
- Industria.
- Ciudades.
- Hogar.
- Personal.

## Medioambiente

Dentro de este ámbito se pretenden incluir todas aquellas aplicaciones centradas principalmente en redes de sensores destinadas a la protección y la salud, no solo del ser humano sino también de nuestro planeta. Como ejemplos destacados para dar una idea de las aplicaciones podemos comentar:

- **Control de contaminación en ríos/mares.** Gracias a una red de sensores autónomos es posible comprobar el estado del agua y medir pH, salinidad, temperatura, iones disueltos oxígeno etc. Un ejemplo comercial sería el sensor de la compañía libelium sobre plataforma Wasp mote (Libelium Wasp mote) el cual es capaz de comunicarse mediante telefonía móvil o mediante 802.14.4 de largo alcance. Como alimentación se puede acoplar paneles solares o baterías. (Libelium Corporation, 2014)



Ilustración 2: Sensor inteligente de monitorización de contaminación acuática



Ilustración 3: Dispositivo localizador IoT

- **Protección de fauna salvaje:** Mediante el uso de collares localizadores es posible conocer la posición de ciertos animales y ayudar a los pastores a proteger sus rebaños sin que sea necesario el uso de la fuerza. Mediante esta aplicación es posible por un lado proteger a los seres humanos y por el otro respetar especies en peligro de extinción. Un ejemplo sería el proyecto “Open Source Lion Tracking Collars” de la compañía Ground Lab basado en la plataforma Open Source Tracking (Ground Lab, 2014) compuesto de un collar con una micro controladora de bajo consumo Atmel y tecnología móvil / GPS para comunicación alimentado por baterías.

- **Prevención de catástrofes:** Una de las aplicaciones con mayor impacto para el ser humano en cuanto a evitar muertes sería la alerta temprana de catástrofes naturales. Gracias a **IoT** los sensores tradicionalmente instalados que solo podían ser leídos en sus centros de control son ahora capaces de comunicarse mediante GSM y ser fácilmente accedidos (entre ellos y con las centrales). Un claro ejemplo es el proyecto ALARMS de la British Geological Survey (British Geological Survey, 2010) que ha conseguido integrar en un dispositivo de bajo coste con capacidad GSM sensores miniaturizados para alertar de manera temprana la inestabilidad del suelo (previando así los corrimientos de tierra).

Estos ejemplos no solo nos dan una idea de las capacidades de **IoT** en cuanto a la conservación del flora, fauna y medio-ambiente sino que permiten también entrever el potencial de esta tecnología con fines científicos, ya que abre nuevos campos de investigación gracias a la creación de redes sensoriales autónomas accesibles desde cualquier terminal del mundo (como por ejemplo el proyecto de Nik Sargent “*bumblebee*” que monitoriza video, audio y variables de entorno de los abejorros). (Sargent)

## Industria

Si consideramos a los autómatas industriales como los precursores de **IoT** es fácil suponer que el ámbito industrial es el que más aplicaciones a día de hoy reúne. Esta categoría englobaría todos aquellos dispositivos cuya finalidad sea dar un valor añadido a cualquier sector industrial, ya sea aportando seguridad, monitorización o mejora de procesos productivos en general. Por poner algunos ejemplos podemos nombrar:

- **Monitorización de estructuras:** Un claro ejemplo de **IoT** es el sistema SmartPile© (Smart Structures Inc., 2014). Este sistema está basado en la instalación de un sensor wireless integrado en el cemento mientras fragua, de tal manera que queda unido a la estructura, proporcionando datos a tiempo real de las tensiones que soporta dicha columna.
- **Seguridad:** Otro ejemplo de uso en el sector industrial englobaría la seguridad, como por ejemplo el sistema enGauge© (enGauge Inc., 2014) que permite controlar el estado de los extintores, mandando alertas vía wireless en caso de fallo/avería.
- **Analytics:** Uno de los campos que más se está desarrollando. Gracias al auge de los sistemas BigData se están instalando sensores en los supermercados que analizan en tiempo real el comportamiento de los consumidores, de manera que son capaces de predecir los productos que tienen más éxito, los



Ilustración 4 Sistema SmartPile antes de fraguar el cemento.

caminos más transitados y las estanterías más vistas, todo ello funcionando de manera totalmente autónoma. (Groendeltd, 2012).

## Ciudades

El término “SmartCity” ha evolucionado gracias a **IoT** hasta el punto que podría considerar como una categoría. En este apartado se consideran todos aquellos usos que estén relacionados con hacer de las ciudades “cosas” inteligentes.



- **Ayuda al estacionamiento:** ParkSighth™ guía a los usuarios de vehículos a espacios libres de estacionamiento mediante una red de sensores autónoma wireless que inyecta los datos en una aplicación web en tiempo real (Streetline Inc., 2014), de esta manera se optimizan los recursos, disminuye la contaminación y se ahorra combustible.

**Ilustración 5 Sistema de guía de aparcamiento.**

- **Contenedores inteligentes:** Una alternativa propuesta por la compañía Bigbelly consiste en dotar a los contenedores de sensores que comunican a la central su estado en tiempo real, facilitando así la recogida optimizando los recursos. (Bigbelly Inc.).
- **Control eléctrico:** Proyecto que mediante sensores alimentados con baterías detectan caídas de tensión, fallos de suministro o bypass en tiempo real notificándolo a la central, permitiendo a los gestores disminuir los problemas y ahorrar en costes. (Awesense Inc.).



**Ilustración 6: Red de detección de corriente eléctrica SenseNET Raptor.**

## Hogar

En esta categoría englobamos toda aquella domótica que es capaz de actuar y comunicarse de manera autónoma. Al contrario que sucede con las aplicaciones de carácter industrial, este campo no está tan orientado al ahorro de gasto sino a la seguridad y comodidad. Algunos ejemplos interesantes son:

- **Control térmico** : La empresa Nest ofrece un producto que combina sensores en casa, las predicciones a tiempo real del tiempo y la actividad en el hogar para controlar la temperatura, haciendo que se ahorre hasta un 30% en el consumo de combustible y mejorando la habitabilidad. (Nest Inc., 2014).
- **Sistema de riego autónomo**: EL proyecto HarvestGeek de Michael Alt es un sistema de monitorización y automatización para plantas que permite controlar el crecimiento y regar de manera autónoma, siendo fácilmente adaptable desde 1 planta hasta 26.

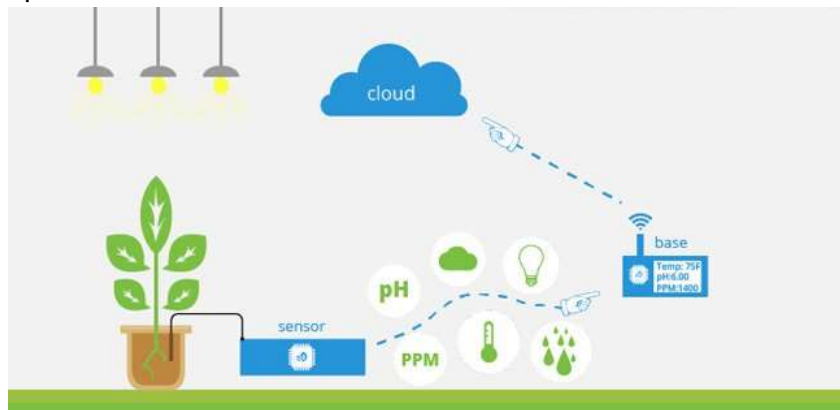


Ilustración 7 Ciclo de funcionamiento del Proyecto HarvestGeek.

- **Control del hogar**: Sistemas como Ninja Block (NinjaBlocks, 2014) permiten controlar de manera remota la temperatura, si se pulsa el timbre o si se abre una puerta o ventana. Todo ello se hace de manera autónoma y se informa directamente a un Smartphone.

## Personal

En esta categoría se consideran por ejemplo todos aquellos objetos denominados “wearables” y los relacionados con el control/ayuda al ser humano. Este campo es otro de los que más está evolucionando y donde las compañías prevén mayor crecimiento. Existen una vez más cientos de proyectos, sin embargo podemos destacar los siguientes:

- **Píldoras inteligentes:** (Proteus Digital Health)  
Tal vez uno de los proyectos más revolucionarios que se puedan encontrar. Este sistema se compone de un sensor fabricado completamente a base de nutrientes sin antena ni baterías que se activa con los fluidos del estómago.



Ilustración 8: Píldoras inteligentes

Añadido a una medicina es capaz de transmitir un código único que recoge un parche dérmico desechable que captura pulso cardíaco, actividad y horas de ingesta de medicación al tiempo que emite mediante Bluetooth.

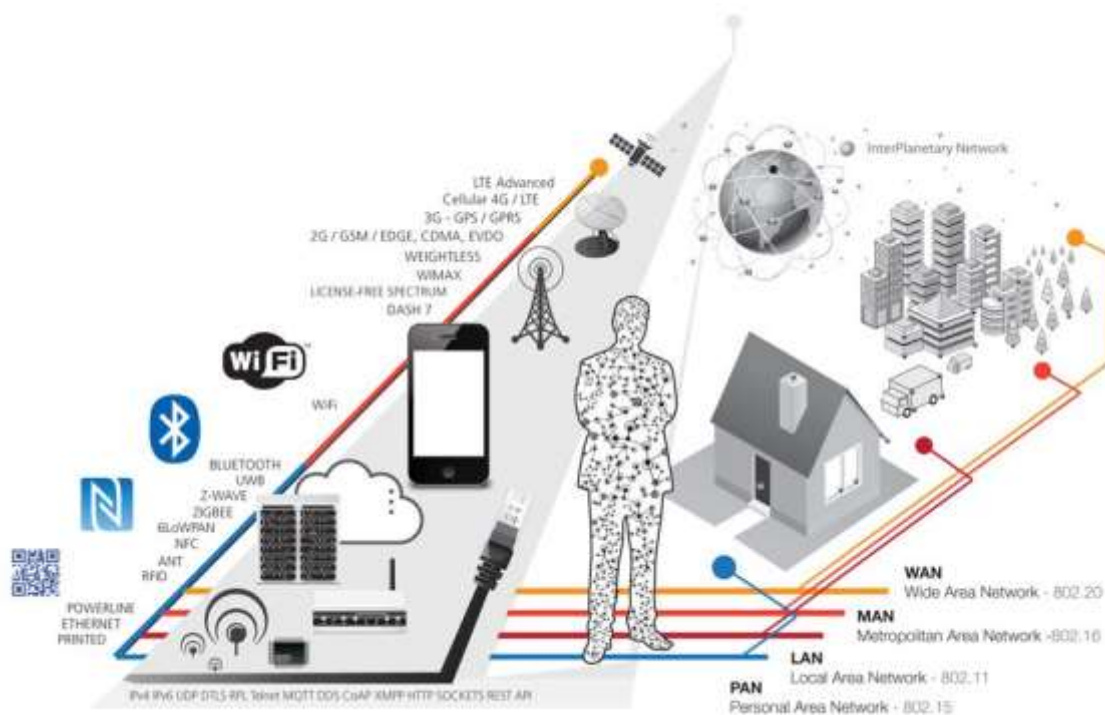
- **Trajes de control para bebe:** (Mimo) Un interesante proyecto que dota a los trajes del bebe de sensores capaces de transmitir a la nube e informar de los ciclos de sueño, respiración, posición, temperatura, audio etc...



Ilustración 9: Mimo Smart Baby.

## Tecnologías de comunicaciones IoT

Una vez mencionadas algunas de las aplicaciones de **IoT** llega el momento de avanzar en su estudio analizando las tecnologías de comunicación que permiten hacer realidad las aplicaciones expuestas anteriormente. Existen múltiples estándares de comunicación y modelos, estando cada uno de ellos adaptado a una necesidad diferente. Para poder continuar el análisis, usaremos la siguiente imagen en la que podemos hacernos una idea de la cantidad de tecnologías que pueden intervenir a la hora de realizar la comunicación (cortesía de Postscapes).



**Ilustración 10: Clasificación de IoT en base al rango de cobertura de los dispositivos.**

Para poder acotar el estudio del presente documento se procederá a realizar una primera separación por rango de las redes:

1. **WAN:** Wide Area Network. Podemos considerar como WAN a todas aquellas redes de telecomunicación que unen grandes distancias, ya sea entre ciudades, regiones o países. Unir dos puntos lejanos mediante una red WAN suele implicar tener que atravesar porciones de la red pertenecientes a varias compañías o estados, por lo que podríamos hablar de un tipo de red pública. Este es por tanto el rango superior llegando a comunicarse los dispositivos de un lado a otro del mundo.
2. **MAN:** Metropolitan Area Network. El rango de este estándar está comprendido entre una red local y varias manzanas de una ciudad (o algunas ciudades

juntas como máximo). Al contrario que las WAN estas redes pueden pertenecer a una sola organización, aunque es normal que se comparta entre varias para soportar mejor los gastos.

3. **LAN:** Local Area Network. Las principales diferencias entre LAN y WAN son mucha menor área de cobertura y la ausencia de líneas de telecomunicación en leasing (son privadas). Se considera una LAN desde la red de una empresa hasta la de un hogar, y por lo tanto es una red que puede ser compartida.
4. **PAN:** Personal Area Network. Estas redes de corto alcance cubren de varios centímetros a algunos metros, por lo tanto cubre la menor proporción de espacio de todas las tecnologías mencionadas. Otra gran diferencia es que estas redes son privadas y personales no pudiendo ser compartida (se podrían considerar redes punto a punto de corto alcance).

La redes PAN y LAN es posible agruparlas ya que el ámbito de cobertura que tienen podría decirse que es similar y además, ambas son redes privadas, por lo tanto es posible ahora realizar un análisis de las tecnologías que actúan en cada uno de ellos, separando en tres grandes bloques, comunicaciones **WAN**, **MAN** y **LAN/PAN**. Con la ayuda de la imagen que se muestra a continuación se hace un repaso a cada una de las tecnologías de una manera esquemática.

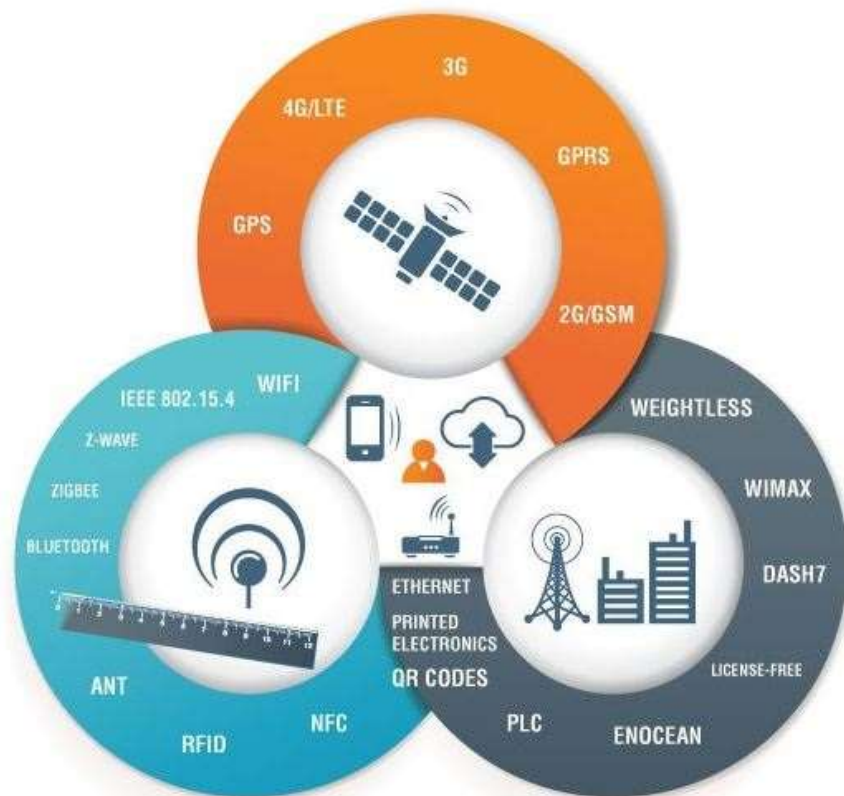


Ilustración 11: Detalle de tecnologías según rango de comunicación WAN,MAN y LAN/PAN.

## Tecnologías WAN

En esta categoría se analizan aquellas tecnologías que permiten la comunicación inalámbrica de dispositivos interconectados a escala mundial, teniendo en cuenta solamente el método de transmisión y recepción (se obvian las tecnologías implicadas en la transferencia por quedar fuera del alcance de este proyecto).

### 4G/LTE

#### Descripción:

4G LTE (Long Term Evolution) es un estándar de comunicaciones inalámbrico de alta velocidad de transmisión para dispositivos en uso desde el año 2008. Está basado en la tecnología de red GSM y HSPA, siendo esta la cuarta generación. La arquitectura principal es común a las anteriores versiones en cuanto a requerir una tarjeta SIM con un contrato y una torreta que dé cobertura al terminal, sin embargo la gran diferencia de LTE frente a sus predecesoras radica en que las antenas de comunicaciones de las torretas están basadas en redes IP tanto para datos como para voz, permitiendo simplificar los costes de operación y aumentar considerablemente el rendimiento.

Esta modificación de arquitectura ha hecho que las antenas sean incompatibles con 3G y 2G, por lo tanto todos los dispositivos **IoT** que pretendan usar LTE deberán tener capacidad multibanda para poder ser utilizados en todo el mundo. (Rohde&Schwarz, 2012).

Por último esta tecnología requiere (al igual que en todas aquellas que hagan uso de sistemas de telefonía) de un contrato con un operador para poder usar las torretas, por lo tanto estamos ante dos factores limitantes, el coste por uso y la necesidad de disponer de cobertura LTE en la localización de los dispositivos **IoT**.

#### Frecuencia de funcionamiento:

En Europa opera en las bandas de 800,900, 1800 y 2600 MHz mientras que en USA por ejemplo opera en las bandas entre 700 y 850 y 1700 y 2600 aproximadamente.

#### Rango:

Puede alcanzar los 50 Km dependiendo de la potencia de los equipos, las antenas y el nivel de obstrucción de la señal.

#### Velocidad de transferencia:

Dependiendo del número de canales usados la velocidad varía según la tabla siguiente:



| UE Category | Max. number of DL-SCH transport block bits received within a TTI | Max. number of bits of a DL-SCH transport block received within a TTI | Total number of soft channel bits | Max. number of supported layers for spatial multiplexing in DL | Max. DL data rate |
|-------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------|
| 1           | 10296                                                            | 10296                                                                 | 250368                            | 1                                                              | 10 Mbps           |
| 2           | 51024                                                            | 51024                                                                 | 1237248                           | 2                                                              | 51 Mbps           |
| 3           | 102048                                                           | 75376                                                                 | 1237248                           | 2                                                              | 102 Mbps          |
| 4           | 150752                                                           | 75376                                                                 | 1827072                           | 2                                                              | 151 Mbps          |
| 5           | 302752                                                           | 151376                                                                | 3667200                           | 4                                                              | 303 Mbps          |

Ilustración 12: LTE capacidades

**Aplicaciones:**

Telefonía, enlaces M2M, contadores inteligentes, control de activos (vehículos, mercancías....)

**3G****Descripción:**

3G es un estándar de comunicaciones inalámbrico de tercera generación para dispositivos basado en la tecnología de red GSM y HSPA y ha sufrido varias revisiones que han visto aumentando sus prestaciones sensiblemente, fue lanzado de manera comercial en 1998 y sigue en funcionamiento (aunque con revisiones y mejoras).

La arquitectura de funcionamiento es similar a la tecnología 4G sin embargo, esta red mantiene la voz mediante una red celular clásica y los datos los transmite mediante una red Ip, por lo tanto son necesarias dos frecuencias de funcionamiento (y dos antenas).

**Frecuencia de funcionamiento:**

Las bandas más comunes de funcionamiento serían las propuestas por UMTS, 850, 900 1900 y 2100.

**Velocidad de transferencia:**

Las últimas revisiones (HSPA+) ofrecen hasta 28 Mbits/s de descarga y 22 Mbits de subida sin embargo las primeras revisiones apenas alcanzaban 200 Kbits de subida.

**Rango:**

Igual que 4G.

**Aplicaciones:**

Igual que 4G.

## 2G/GPRS/EDGE/GSM

### Descripción:

2G es la segunda generación de estándares de comunicaciones inalámbrica aplicada a la telefonía celular, siendo esta la primera generación digital. Nació en 1991 y todavía hoy sigue en funcionamiento en poblaciones con baja densidad de población y torretas anticuadas.

Este sistema evolucionó dando lugar a las tecnologías GPRS y EDGE que aumentaban considerablemente las prestaciones, pasando de ser un servicio de baja velocidad de transmisión (2G) hasta los 500 Kbits/s de EDGE.

### Frecuencia de funcionamiento:

El 80% utiliza la versión basada en TDMA a 450MHz para 2G sin embargo EDGE por ejemplo hace uso de la codificación 8PSK.

### Aplicaciones:

Similares a las tecnologías GSM teniendo en cuenta la limitación en cuanto ancho de banda.

## Tecnologías MAN

En esta categoría se analizan aquellas tecnologías diseñadas para dar cobertura en el rango de una ciudad principalmente, y una vez más se tiene en cuenta solamente el método de transmisión y recepción, descartando las tecnologías que puedan actuar de transmisoras.

### Weightless

### Descripción:

Weightless es una tecnología de comunicación inalámbrica de última generación orientada a M2M y con tres premisas fundamentales, muy bajo coste, muy bajo consumo y buena propagación de onda para aumentar su rango de trabajo.

Actualmente existen dos versiones de esta tecnología, Weightless-W diseñada para el uso de las frecuencias de ruido blando en la señal de televisión y la versión N (en diseño) que hace uso de la banda de frecuencia ISM. El gran atractivo de esta tecnología reside en que los dispositivos tienen un alcance de hasta 5 km, un coste que ronda los 2\$ y además una duración estimada de batería de hasta 10 años.

Además de todo ello, al hacer uso de bandas en baja frecuencia consigue alcanzar una alta penetración en edificios y mejora su propagación tal y como se

puede comprobar en la imagen siguiente. (WeighLess TM., 2014)

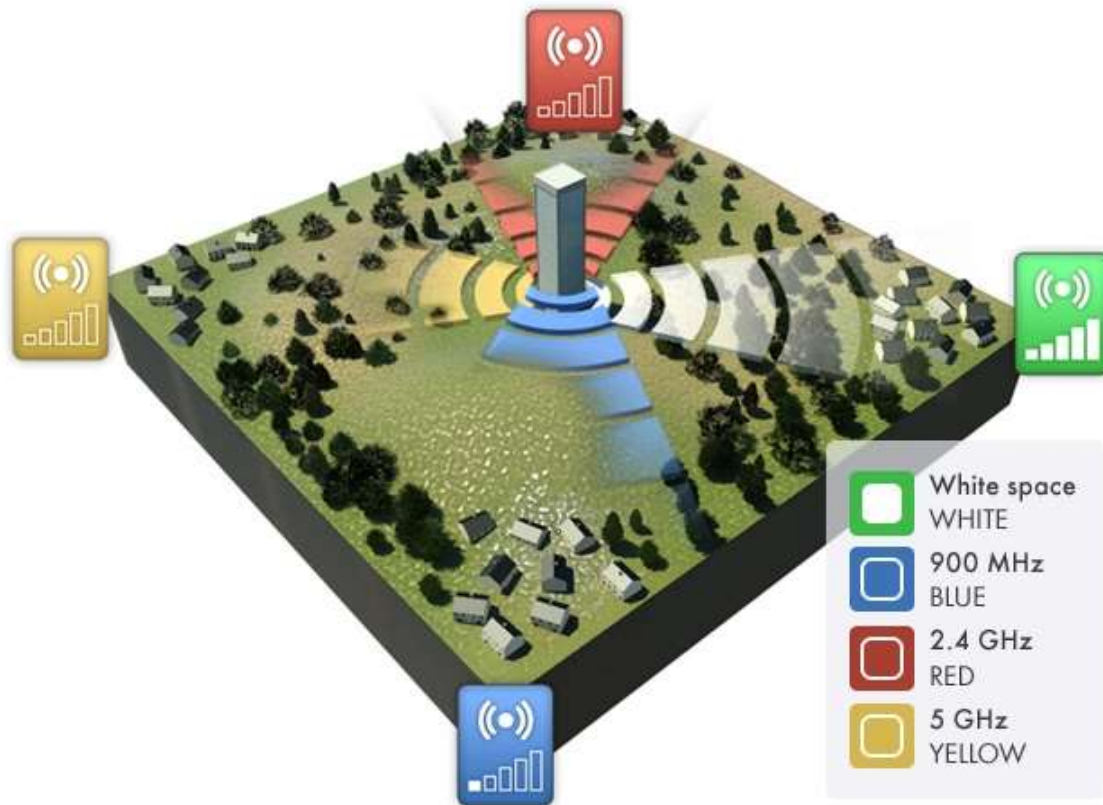


Ilustración 13: Comparativa de propagación entre frecuencias de operación.

**Frecuencia de funcionamiento:**

Por debajo de 1 GHz para ambas versiones, siendo más baja la frecuencia de operación de ruido blanco (entre 400 y 800 MHz).

**Rango:**

Hasta 5 Km.

**Aplicaciones:**

Dada su alta penetración en edificios, su bajo consumo y bajo coste es ideal para cualquier aplicación **IoT** en Smart city.

**Wimax**

**Descripción:**

WiMAX™ es una tecnología de comunicación inalámbrica basada en estándar IEEE 802.16 y está diseñado específicamente para enlaces sin línea de visión directa (NLoS) entre el suscriptor y la estación base, por lo tanto la hace especialmente útil para entornos urbanos densamente poblados donde es utilizada para el despliegue de última milla de líneas de acceso a internet.

Debido al alto coste de las estaciones y terminales este tipo de tecnología ve reducida su utilidad a aquellas aplicaciones de **IoT** en las que el número de dispositivos sea bajo y el coste no sea un factor determinante. Sin embargo el uso del WiMAX si tiene especial interés actuando como nexo de unión entre redes (uniendo por ejemplo un nodo Zigbee con internet).

Tal y como podemos ver en la imagen siguiente se podría considerar el WiMAX como el punto intermedio entre velocidad y movilidad de las tecnologías inalámbricas.

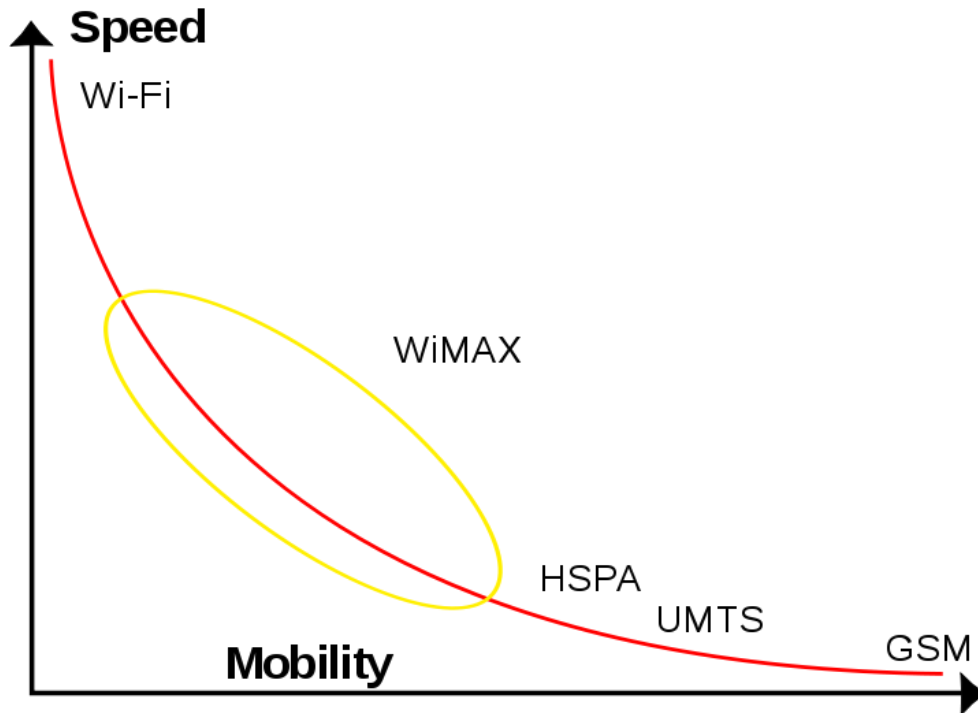


Ilustración 14: Comparación velocidad y movilidad de tecnologías inalámbricas.

(WiMAX Forum, 2012)

**Frecuencia de funcionamiento:**

Las frecuencias de funcionamiento recomendadas por el fórum Wimax son 2,3 GHz, 2,5 GHz y 3,5 GHz.

**Rango:**

Es posible alcanzar más de 50 Km sin embargo esto es a costa de reducir su velocidad de transferencia, siendo capaz de proveer una velocidad de 100 Mb/s a corto alcance (menos de 1 Km) y de tan solo 4 Mb/s.

**Aplicaciones:**

Routers, acceso de internet de última milla, aplicaciones en zonas NLoS.

## Dash7

### Descripción:

Dash7 es un estándar abierto de comunicación de baja potencia y rango medio diseñado en base al modelo **BLAST** (*Bursty Light data Asynchronous Stealth Transient*), cuyas características hacen que las transmisiones sean caracterizadas por: (Dash7 Alliance, 2014):

- **Bursty:** La transmisión de datos es abrupta y no contiene audio ni video.
- **Ligera:** Los paquetes suelen estar limitados a 256 bits.
- **Asincrónica:** Por diseño la comunicación no requiere saludo ni sincronización de dispositivos.
- **Stealth:** Los nodos de conexión pueden escoger comunicarse solo con algunos dispositivos.
- **Transitional:** Al contrario que otras tecnologías Wireless, Dash7 está orientado a la subida de datos por lo que es más sencillo hacer que respondan a ciertos dispositivos.

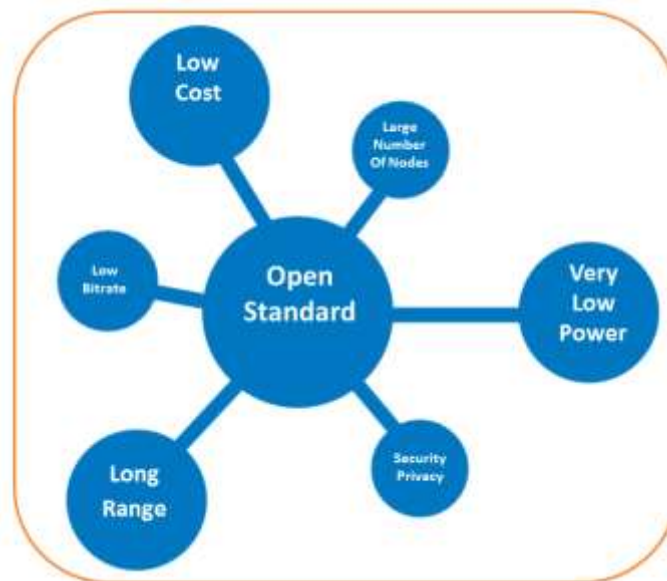


Ilustración 15: Esquema de características de tecnología DASH7

Gracias a su diseño y a la duración de la batería (en algunos casos de años) esta tecnología está especialmente adaptada para ser utilizada en redes sensoriales, donde su rendimiento está demostrando que es muy superior al WiFi, ZigBee y tecnologías RFID activas.

### Frecuencia de funcionamiento:

Este estándar está diseñado para operar en la banda inferior a 1 GHz por la resiliencia característica de ese espectro y la banda de los 433 MHz.

**Rango:**

El rango puede variar entre varios metros y varios kilómetros siendo capaz de dar su posición en interiores con 1 metro de precisión.

**Aplicaciones:**

Información de plazas libres en parkings, dispositivos que presentan información en base a la posición (útil para museos por ejemplo), o la implementación de un sistema de monitorización de mercancías dentro de almacenes en minutos sin necesidad de cableados ni antenas.

**ENOCEAN**

**Descripción:**

EnOcean es una tecnología inalámbrica revolucionaria con función de captación de energía. Su principal elemento diferenciador con respecto al resto de competidores consiste en disponer de un sistema de alimentación completamente autónomo (sin batería), lo cual lo hace ideal para aquellas aplicaciones del tipo de redes sensoriales. (EnOcean, 2014)

Existen actualmente 3 modelos de captación de energía:

- Captación de energía mediante movimiento:** Este sistema está basado en la conversión de energía electrodinámica. Mediante el ligero movimiento de un pequeño botón el sistema es capaz de generar energía para enviar 3 datagramas con una sola oscilación.
- Células solares de interior:** Este sistema permite la conversión lumínica en energía, estando especialmente diseñado para funcionar en interiores, con un tamaño de entre 5 cm y 3.5 cm es fácilmente acoplable a cualquier sensor . Existen dos variantes, una permite la comunicación unidireccional y la otra bidireccional.
- Conversión térmica:** Mediante estos módulos es posible capturar la energía térmica emitida por radiadores, maquinaria o el propio cuerpo humano y convertirla en energía eléctrica, sumado a todo ello el rango diferencial de temperatura para su correcto funcionamiento es muy bajo, no siendo necesario grandes cambios de temperatura para su funcionamiento.



**Ilustración 16: Conversor cinético EnOcean**



**Ilustración 17: Conversor lumínico de interior EnOcean**

La unión de un diseño de protocolo de bajo consumo unido a los captadores de energía hacen que esta tecnología disponga de una gran flexibilidad en cuanto a aplicaciones, ahorrando mucha energía y requiriendo menos mantenimiento (dispositivos del tipo instalar-olvidar). A todo hay que sumarle que son ecológicamente compatibles. Por todo ello estamos ante una tecnología con un gran futuro en cuanto a monitorización industrial y de edificaciones fundamentalmente.



Ilustración 18: Conversor térmico EnOcean

**Frecuencia de funcionamiento:**

Dos frecuencias de funcionamiento, a 315MHz y a 868 MHz.

**Rango:**

Los sistemas bajo este estándar son capaces de enviar datos hasta a 30 metros dentro de edificios y hasta 300 metros en terreno libre.

**Aplicaciones:**

Automatización de edificios, Hogares inteligentes, Medicina (control de pacientes), logística.....

**PLC**

**Descripción:**

Power-Line Communication (PLC) hace referencia a un sistema de transmisión de datos a través de cableado por el cual discurre simultáneamente corriente alterna. El IEEE creó el estándar 1901-2010 para dotar de un marco común para todos los desarrolladores.

La principal ventaja de este método de transmisión de datos entre dispositivos radica en que si es necesario alimentarlos mediante corriente eléctrica no es necesaria la instalación de más cableado.

Existen dos modelos de funcionamiento, PLC de banda estrecha o de banda ancha. La banda estrecha tiene su uso en aplicaciones residenciales o tipo LAN, mientras que las soluciones de banda ancha permiten la transmisión a grandes distancias (pudiendo ser usado para proveer de acceso a internet).

Sin embargo el gran problema de esta tecnología viene caracterizado por la naturaleza del trenzado de cable eléctrico que se encuentra sin blindar y sin giros, por lo tanto termina comportándose como una antena, provocando interferencias y recibíendolas de las emisiones de radio.

**Frecuencia de funcionamiento:**

Su frecuencia de funcionamiento está entre los 3kHz y los 148.5kHz para banda estrecha y entre 1MHz y 30MHz para banda ancha.

**Rango:**

Esta tecnología es capaz de transmitir a cientos de kilómetros, sin embargo el coste de las estaciones de transmisión y recepción de broad-band long-haul son muy altos.

**Aplicaciones:**

Todas aquellas aplicaciones en los cuales exista alimentación eléctrica y/o entornos hostiles de radiotransmisión.

**Ethernet**

**Descripción:**

Ethernet es una familia de tecnologías de red de transmisión por cable, ya sean de cobre, coaxial o fibra óptica. A día de hoy se considera la tecnología dominante en transmisión de datos a nivel mundial aunque poco a poco comienza a desplazarla las tecnologías WiFi.

Las principales ventajas de esta familia son las altísimas velocidades de transmisión posibles y las largas distancias que es capaz de cubrir, todo ello siendo muy resistente a las interferencias (gracias al blindaje de los cableados o las propias características de la transmisión de ondas lumínicas).

Sin embargo, los principales puntos débiles de esta tecnología tales como la falta de movilidad y dificultad de instalación (necesario tendido de cableado) hacen que su aplicación en **IoT** quede limitado a aquellas aplicaciones que requieran un muy alto ancho de banda o la seguridad que proporciona el cableado físico.

**Rango:**

El rango de redes Ethernet puede variar desde redes LAN de pocos metros hasta cientos de kilómetros mediante enlaces de fibra óptica (incluso miles mediante el uso de amplificadores)

**Aplicaciones:**

Fundamentalmente como enlace entre nodos y con internet en localizaciones estáticas.



## Tecnologías LAN/PAN

Dentro de este apartado se estudiarán todas aquellas tecnologías de **IoT** que cubran el ámbito de redes de área local o redes de área personal, con un rango desde varios metros hasta centímetros.

Dado que la gran mayoría de aplicaciones de **IoT** están relacionadas con este tipo de redes prestaremos especial detalle a esta sección, decidiendo en última instancia las tecnologías más usadas analizándolas más en detalle.

### WIFI

#### Descripción:

Es posible considerar como WiFi a todos aquellos dispositivos inalámbricos que utilizan los estándares IEEE 802.11, o lo que es lo mismo, es una tecnología de intercambio de datos inalámbrica que sigue los estándares del IEEE.

Si bien es cierto que inicialmente los protocolos basados en IEEE 802.15.4 han sido los dominantes poco a poco los desarrolladores están reduciendo el consumo de los dispositivos WiFi de manera que puedan competir con tecnologías como Zigbee o 6LoPAN.

Una de las grandes ventajas que dispone WiFi frente a sus competidores con menos consumo es que disponen de compatibilidad nativa para redes IP, lo cual es muy importante para las redes **IoT**. Otra de las grandes ventajas es lo ampliamente extendido que está esta tecnología en redes LAN lo cual permite disponer de herramientas más avanzadas y una integración mucho más sencilla. (Serbulent Tozlu, 2012)

En el lado negativo es fácil entrever que el ser compatible de manera nativa con IP tiene un efecto nocivo en cuanto a la duración de la batería, ya que al contrario que con otras tecnologías es necesario realizar conexiones periódicas ( con el consiguiente wake-up).

#### Frecuencia de funcionamiento:

Funciona en las bandas de 2.4 GHz y la de 5GHz.

#### Rango:

Usando medios convencionales hasta 100 metros en espacio abierto, 20 en edificios.

#### Aplicaciones:

Routers, Tablets, laptops.

## IEEE 802.15.14

### Descripción:

Este estándar de comunicaciones especifica la capa física y la de acceso al medio para redes personales de bajo consumo y es la parte básica de tecnologías como ZigBee, MiWi o WirelessHART. Al contrario que WiFi, este estándar está específicamente diseñado para redes WPAN con dispositivos muy cercanos unos a otros, con poca o ninguna infraestructura y haciendo especial hincapié en velocidades de transmisión bajas y muy bajo consumo, lo cual la hace ideal para **IoT**.

En concreto podemos decir que los pilares sobre los que se ha diseñado este estándar son:

- Conseguir que el precio de fabricación y operación de los dispositivos sea muy bajo (del orden de dólares).
- Conseguir que sea tecnológicamente sencillo.
- No renunciar a la flexibilidad o las posibilidades de uso.
- Muy bajo consumo de energía.

El marco básico de funcionamiento establece comunicaciones a 10 metros con 250kb/s, siendo posible disminuir la velocidad para conseguir una mayor eficiencia de energía.

### Frecuencia de funcionamiento:

En Europa 868 MHz, USA 902-928 MHz y mundial 2400-2483.5 MHz.

### Rango:

Hasta 10 metros en aplicaciones normales.

### Aplicaciones:

Todas aquellas redes de sensores/actuadores de corto alcance y bajo consumo que requieran de una tecnología ampliamente extendida y conocida.

## Z-WAVE

### Descripción:

Z-Wave es un protocolo de comunicaciones diseñado específicamente para su uso en domótica del hogar o pequeños comercios. Esta tecnología está compuesta por un emisor de radio frecuencia de bajo consumo que puede ser encastrado en sistemas de iluminación, controles de acceso et c.

Su esquema de funcionamiento es en red de malla siendo necesario tan solo dos dispositivos para comunicarse (un controlador y un dispositivo) pudiendo ir añadiéndose después más controladores o dispositivos como se deseen.

Sus principales ventajas son (Z-Wave) :

- Fácil de instalar.
- No requiere cableado.
- Requiere poca inversión inicial.
- Seguro y confiable (10 años en el mercado).
- 20 millones de productos en hogares del mundo.
- 9 de cada 10 compañías de seguridad lo usan.

Sus inconvenientes surgen directamente de sus premisas de diseño, está altamente adaptado al entorno de domótica del hogar, por lo tanto sus campos de actuación quedan limitados como tecnología de uso general.

### **Frecuencia de funcionamiento:**

Usa la banda por debajo de 1MHz para evitar interferencias con la banda WiFi o Bluetooth, sin embargo comparte frecuencia con algunos sistemas de telefonía inalámbrica.

### **Rango:**

Hasta 30 metros en espacio libre.

### **Aplicaciones:**

Domótica del hogar.

## **ZIGBEE**

### **Descripción:**

Esta tecnología hace uso de la capa física y de control de acceso al medio del estándar del IEEE 802.15.4, añadiendo cuatro componentes más, como son la capa de red, la de aplicación, los *ZDOs* (Zigbee Device Objects, responsable entre otras cosas del descubrimiento, seguridad y requerimientos de unión a la red) y por último de los objetos de aplicación definidos por los fabricantes que permiten la personalización y favorecen la integración.

Actualmente existen 3 especificaciones que sirven de base para ZigBee (ZigBee Alliance, 2012):

- **Especificación ZigBee:** Es el núcleo de la especificación como tal y define la versión ZigBee y ZigBee PRO (la más extendida). El objetivo de esta especificación es un sistema auto configurable, que sea capaz de auto-repararse, de bajo precio y muy bajo consumo energético, todo ello combinado con flexibilidad, movilidad y sencillez de uso.
- **Especificación ZigBee IP:** Este estándar abierto es el primero para IPv6 que permite conectar completamente la red mesh a internet y está específicamente diseñado para dar soporte al estándar ZigBee Smart Energy ver.2 que está en desarrollo.
- **Especificación RF4CE:** Esta especificación es una particularización de los casos de usos en los que no es necesario una red Mesh completa, sino que es más bien para conectar dos dispositivos entre ellos, con lo que se consigue que el requerimiento de memoria sea mucho menor permitiendo con ello reducir aún más el coste.



Ilustración 19: ZigBee, importancia en IoT.

Tal y como se puede apreciar en la imagen esta tecnología no ha hecho más que crecer desde su nacimiento hasta convertirse hoy en día en la tecnología de referencia para el estándar IEEE 802.15.4.

**Frecuencia de funcionamiento:**

Dependiendo de la velocidad de transferencia, para la velocidad alta (250kbts/s) usa la banda de 2.4GHz mientras que para la velocidad baja (20 Kbits/s) usa la banda 868 MHz.

**Rango:**

10 metros.

**Aplicaciones:**

Especializado en redes intra-edificaciones, por lo tanto en general todas las aplicaciones de domótica e industriales de corto alcance.

**BLUETOOTH**

**Descripción:**

Bluetooth es una tecnología de comunicación inalámbrica entre dispositivos para intercambio de datos en el ámbito de las redes PAN. Originalmente se diseñó como una alternativa inalámbrica a la comunicación rs-232, sin embargo hoy en día Bluetooth es mantenido por la Bluetooth Special Interest Group y está formado por más de 20.000 empresas.

|                               | Classic Bluetooth technology | Bluetooth low energy technology |
|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Data payload throughput (net) | 2 Mbps                       | ~100 kbps                       |
| Robustness                    | Strong                       | Strong                          |
| Range                         | 300m                         | 250m                            |
| Local system density          | Strong                       | Strong                          |
| Large scale network           | Weak                         | Good                            |
| Low latency                   | Strong                       | Strong                          |
| Connection set-up speed       | Weak                         | Strong                          |
| Power consumption             | Good                         | Very strong                     |
| Cost                          | Good                         | Strong                          |

**Ilustración 20: Comparativa entre Bluetooth Classic y Smart.**

En su primera versión esta tecnología no ofrecía suficientes características que la hicieran atractiva para **IoT**, sin embargo con la aparición de un nuevo estándar denominado Bluetooth Low Energy la situación ha cambiado hasta el punto que algunos especialistas consideran que la creación de **IoT** tiene mucho que ver con esta tecnología (Athrow, 2014) .



**Ilustración 21: Diferencias módulos Bluetooth.**

Al igual que sucede con las tecnologías como ZigBee, el campo de aplicación concreto hace que su desarrollo en un futuro a corto plazo sea muy amplio, siendo a día de hoy uno de los referentes en cuanto a tecnologías en el mercado.

### **Frecuencia de funcionamiento:**

La frecuencia es entre 2.4 y 2.485 GHz.

### **Rango:**

Hasta 40 metros.

### **Aplicaciones:**

Sobre todo wearables y sistemas con un número no muy alto de dispositivos.

## **ANT / ANT +**

### **Descripción:**

Ant es una tecnología de red wireless para sensores, multicast y de acceso abierto desarrollada por Dynastream Innovations (Canada). Al igual que otras tecnologías está orientada especialmente al ULP (Ultra Low Power) de manera que los dispositivos pueden funcionar desde unos meses a años con la ayuda de una pequeña pila.

Este tipo de tecnología tiene corto alcance y soporta varias configuraciones de red, tales como estrella, mesh o P2P haciéndola muy práctica para su uso en redes PAN o LAN incluso (aumentando el rango mediante el uso de redes mesh).

Existen dos versiones de este protocolo, ANT y ANT+ siendo la principal diferencia la compatibilidad total de dispositivos en la tecnología ANT+ mediante el uso de perfiles de uso.

Actualmente su uso está ampliamente extendido en el mundo de los wearables y gadgets de salud personal, sin embargo no ha terminado de despegar como tecnología usada en redes sensoriales industriales. (ANT+, 2014)

### **Frecuencia de funcionamiento:**

La frecuencia de uso es entre 2400 y 2524 MHz

### **Rango:**

Corto alcance, 5 metros.

### **Aplicaciones:**

Actualmente su uso está prácticamente limitado a dispositivos 1 a 1 y de corto alcance pese a que la tecnología está diseñada para redes de dispositivos M2M.

## RFID

### Descripción:

La tecnología RFID es un sistema inalámbrico de identificación por radiofrecuencia basado en el uso de campos magnéticos para transmisión de un identificador gracias a un lector. Esto permite acoplar a objetos (incluso animales) un chip que permite realizarle un seguimiento, aunque no permite la comunicación en los dos sentidos.

Existen 3 modos de transmisión de datos, el primero mediante la inducción de campos electromagnéticos cerca del emisor, el segundo modo mediante el uso de dispositivos con batería que les permita emitir su código (alcanzando incluso cientos de metros) y por último otros actúan como un transponder pasivo usando la energía que reciben del lector al intentar hacer un scan.

### Frecuencia de funcionamiento:

120–150 kHz (LF), 13.56 MHz (HF), 433 MHz (UHF), 865-868 MHz (Europa) 902-928, 2450-5800 MHz ,3.1–10 GHz

### Rango:

10 cm hasta 200 m

### Aplicaciones:

Inventario, Acceso presencial, peajes, ID de animales.

## NFC

### Descripción:

NFC es una tecnología inalámbrica de muy corto alcance con un concepto muy similar a la tecnología RFID, sin embargo en este caso se pretende generar un campo magnético muy pequeño de manera que sea difícil interceptarlo.

Es necesario en esta tecnología que una parte actúe como iniciador generando un campo de radio-frecuencia que puede alimentar a la otra parte que actuará como receptor pasivo. La gran diferencia con un sistema RFID normal es que el código a emitir puede ser variable y se permite la comunicación entre dispositivos ya que ambos pueden estar alimentados por corriente eléctrica.

### Frecuencia de funcionamiento:

Banda de los 13.56 MHz

### Rango:

Menor de 20 cm.

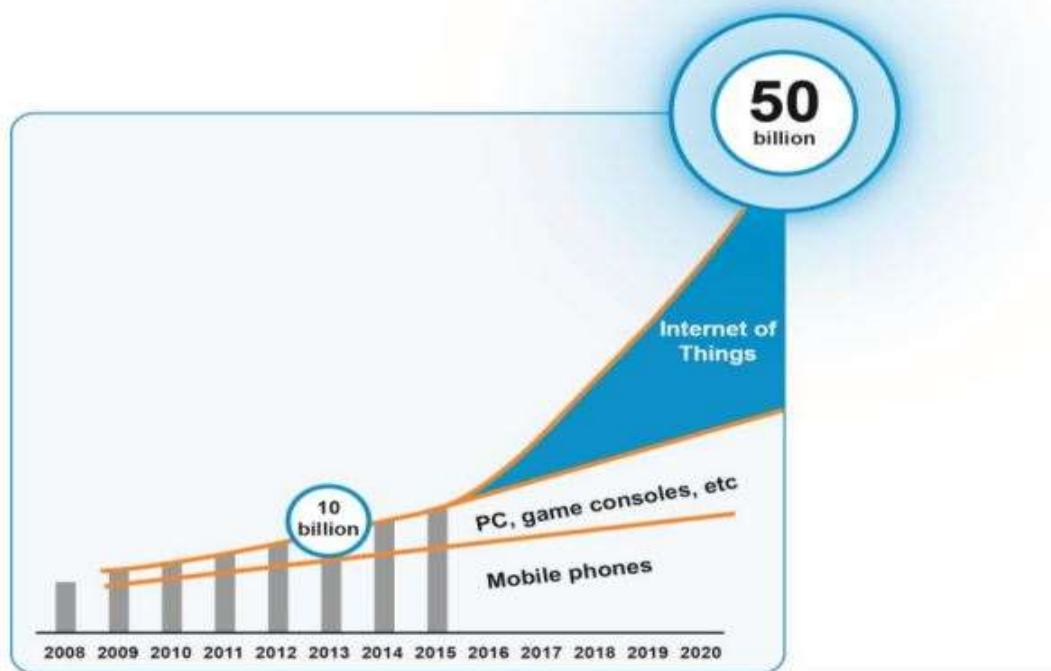
**Aplicaciones:**

Control de acceso, monederos inteligentes, teléfonos para pagos.

**Estado del Arte IoT**

Para poder discernir de las tecnologías que predominan en el mercado aquellas con mayor potencial de desarrollo es necesario realizar primero un breve análisis sobre el estado actual de los mercados y las tendencias.

En primer lugar es necesario establecer el crecimiento potencial de **IoT** en los próximos años. Tal y como se puede observar en la figura adjunta, las previsiones de muchas compañías importantes prevén un aumento espectacular hasta los 50 billones de dispositivos (Bradley, 2013) , (Ericsson, 2010)



**Ilustración 22: Crecimiento del mercado de dispositivos para IoT.**

El desarrollo lineal de **IoT** corresponde a la actualidad y es debido a que el mercado está limitado por lo que se ha venido a denominar como “silos de crecimiento”, en los cuales el movimiento es vertical en cada área concreta, dando lugar a sistemas cerrados incapaces de relacionarse entre ellos.



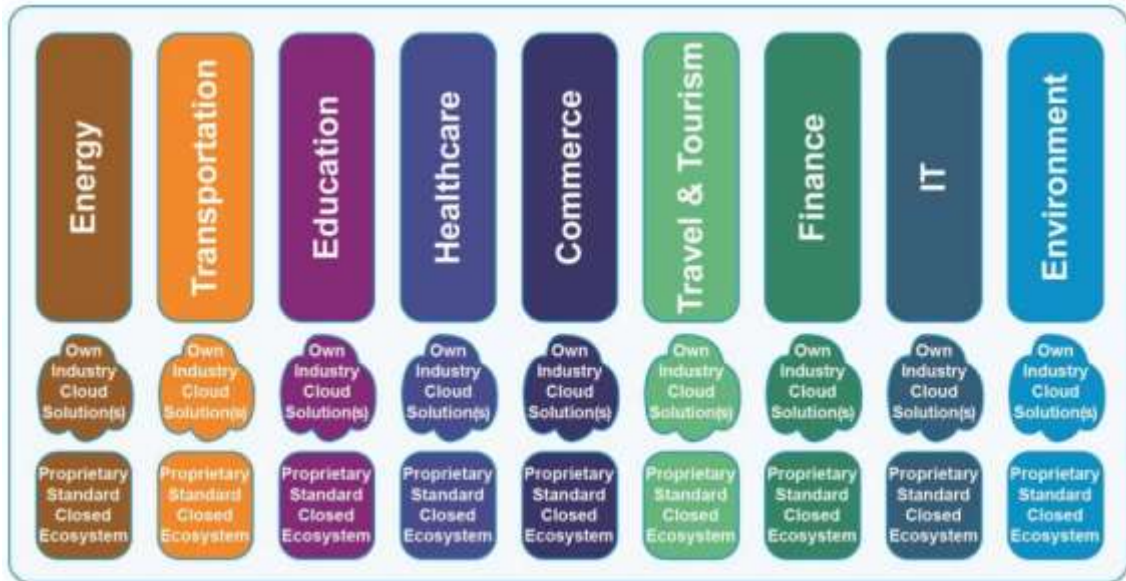


Ilustración 23: Silos de crecimiento de aplicaciones en IoT.

Estos silos dan lugar a aplicaciones extensas pero con muy poca capacidad de interrelación entre ellas, por lo que de mantenerse así el mercado las previsiones no se cumplirán.

El punto de inflexión que convertirá el desarrollo de IoT desde una función lineal a una exponencial se alcanzará cuando los “silos” de aplicaciones se combinen entre ellos dando lugar a nuevas aplicaciones. Para que esto sea posible será necesario que los datos de todos los pequeños dispositivos estén conectados realmente a internet (y no solamente en LAN o PAN). En el momento que se combine esta nueva fuente de información con los conocimientos que se están adquiriendo del “Big Data” se observará el cambio de tendencia previsto en el crecimiento.

Por lo tanto, parece claro que el primer hito a alcanzar es la unión de todos los pequeños dispositivos con internet. Para esto será necesario comprobar cuáles de los dispositivos hoy en día no están interconectados y cuál es su elemento de unión.



Ilustración 24: Dispositivos conectados y desconectados en IoT actualmente.

No es difícil inferir de todos los datos mostrados en este trabajo que la mayoría de los dispositivos que no están unidos a internet corresponden a las redes LAN/PAN. Las grandes distancias hoy en día están unidas en mayor o menor medida mediante líneas fijas de DSL, fibra óptica y telefonía LTE/3G, por lo tanto, el mercado que parece claro dispondrá de mayor crecimiento potencial será el de los dispositivos que cubren la banda inferior a 100 metros.

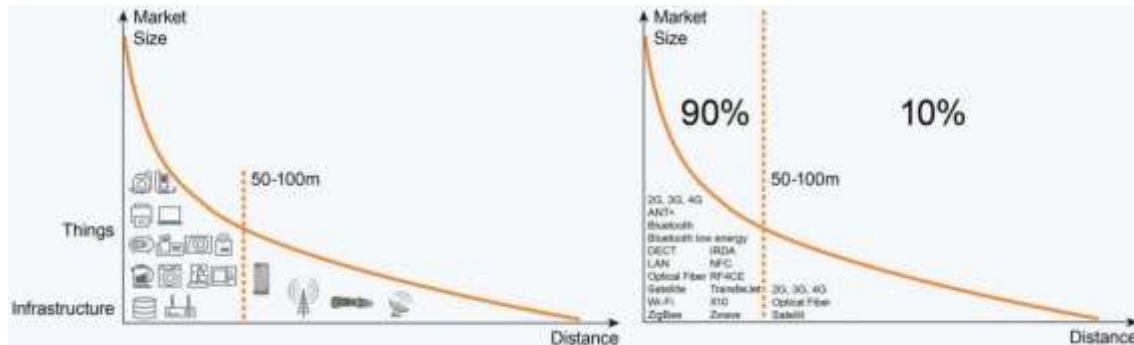


Ilustración 25: Distancia Vs Tamaño de Mercado, potencial de crecimiento en IoT.

Esta primera diferenciación nos permite establecer un punto inicial de separación, sin embargo, sigue sin reducir el número de tecnologías hasta un número apropiado ya que solamente podemos descartar aquellas para redes WAN. Por lo tanto tenemos muchas tecnologías compitiendo por un espectro de banda limitado tanto en frecuencias como en mercado.

Una segunda clasificación sería en cuanto a los requerimientos funcionales exigibles a las tecnologías **IoT**, tales como:

- **Coste:** El coste de la tecnología de radio será uno de los aspectos claves diferenciadores, ya que estamos hablando de aplicaciones dentro del mismo rango, por lo tanto cuanto menor el coste mayor las posibilidades de crecimiento.
- **Consumo:** Muchas aplicaciones requieren una instalación sin alimentación eléctrica, e incluso sin baterías, por lo que será otro de los aspectos claves.
- **Seguridad:** En el mundo actual es básico que la autenticación y la encriptación estén soportadas.
- **Facilidad de uso:** Una de las características que es deseable, aunque no imprescindible.
- **Estandarización internacional y ecosistema disponible:** La capacidad de poder interconectar gran cantidad de dispositivos dentro de un marco internacional tiene también una gran influencia en las posibilidades de presente y futuro.

Una gran porcentaje de las tecnologías mencionadas en el capítulo anterior cubren bastantes de las premisas, sin embargo hay muy pocas que cumplan la existencia de un ecosistema de dispositivos disponible a día de hoy. Como ejemplo la tecnología ANT apenas tiene penetración fuera del mercado de wearables de fitness, y la tecnología EnOcean no está implementada a gran escala, por lo tanto las posibilidades que estas tecnologías consigan una cuota de mercado elevada es dudosa.

Por lo tanto descartaremos aquellas tecnologías con un ecosistema pequeño, consiguiendo reducir notablemente el número de tecnologías candidatas. Si se comparan las tecnologías existentes con respecto a su consumo, rango y velocidad de transferencia, podemos eliminar de nuevo varias tecnologías.

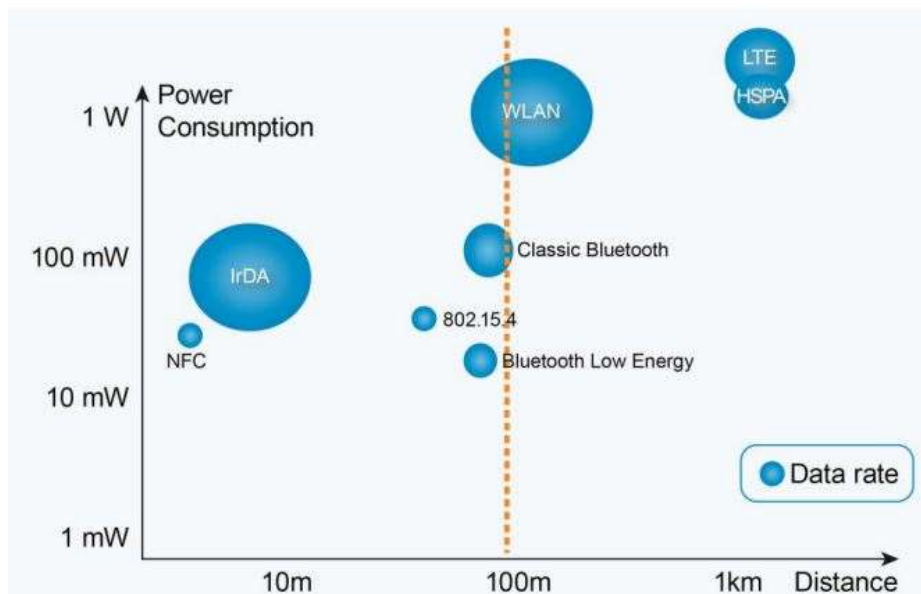


Ilustración 26: Comparativa de tecnologías IoT en cuanto a rango, consumo y velocidad de transferencia

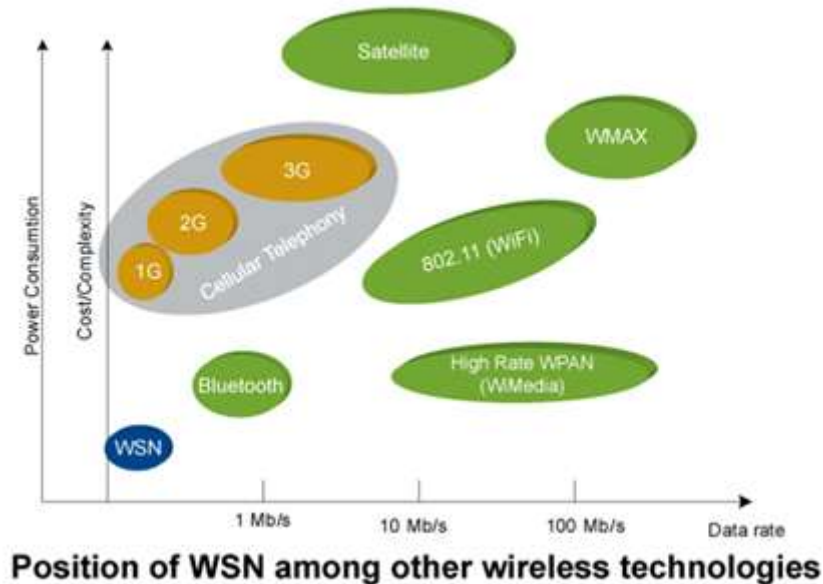
Las tecnologías tipo LTE/HSPA se descartan ya que hemos comprobado que las posibilidades mayores de crecimiento se encuentran en la conexión de dispositivos a menos de 100 metros. Por otro lado las tecnologías como NFC y IRDA no ofrecen los parámetros mínimos en cuanto a rango de aplicación o seguridad, por lo que también se descartan.

Finalmente, se han conseguido resaltar 3 tecnologías candidatas a cubrir gran parte del crecimiento previsto:

- IEEE 802.15.1 Bluetooth Low Energy
- IEEE 802.11 a/b/g/n Wi-Fi
- IEEE 802.15.4

Cada una de ellas tiene sus ventajas e inconvenientes sobre las otras, sin embargo entre las tres deberían de ser capaces de cubrir la gran mayoría del crecimiento de IoT (de manera individual o combinada). Una de las características que

todos los fabricantes han marcado como crítica a la hora de ganar espacio en el mercado para los dispositivos **IoT** ha sido el consumo de energía.



**Ilustración 27** Comparativa consumo /coste / velocidad de transmisión de tecnologías

En este sentido existen numerosos estudios que demuestran que en el apartado de energía solamente las tecnologías Bluetooth Low Power y las nuevas tecnologías basadas en IEEE 802.14.4 tienen realmente algo que ofrecer.

Si bien es cierto que la tecnología Bluetooth ofrece un ecosistema mucho más rico que las tecnologías tipo 6LoWPAN, es también igual de cierto que los dispositivos basados en IEEE 802.15.4 y sus evoluciones están diseñados íntegramente pensando en redes de sensores de bajo consumo, y ese es uno de los puntos detectados por todas las grandes multinacionales como un punto de crecimiento importante. Según las previsiones de crecimiento de negocio, el sector que más crecerá individualmente será el del hogar, el cual es muy posible que se cubra fundamentalmente con tecnologías Bluetooth debido a su alta penetración existente en la actualidad en los hogares.

Sin embargo el crecimiento combinado del resto de sectores supera de largo los ingresos en hogar, y esas otras áreas están mucho más adaptadas para su uso con redes de sensores Wireless de ultra bajo consumo del tipo 802.15.4.

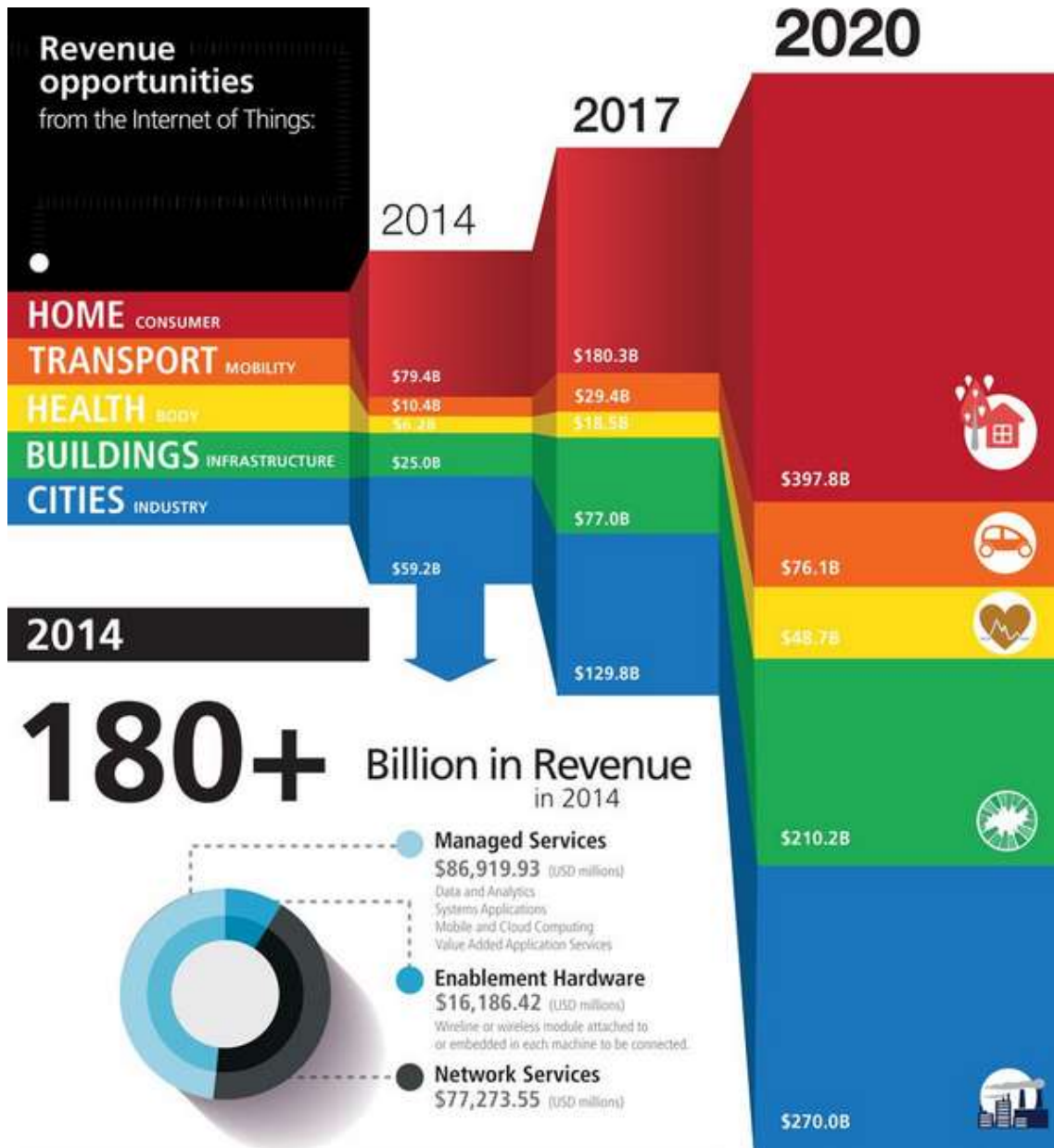


Ilustración 28: Crecimiento estimado IoT por ingresos futuros

Por todo ello a partir de este punto nos centraremos en los aspectos técnicos que hacen de este estándar el más prometedor de cuantos hemos analizados.

## Tecnología IEE 802.15.4 y sus evoluciones

Para realizar un análisis coherente de esta tecnología se va a proceder analizando las diferentes capas que la componen. Hay que tener en cuenta que el estándar IEEE 802.15.4 solamente especifica las capas físicas y de control de acceso al medio (MAC), y que tan sola provee de especificaciones básicas en cuanto a radio frecuencias y red. Para completar la solución IoT ha sido necesario añadir una suite de protocolos que permitan que esté listo para usar en el mundo cotidiano (como

ZigBee, WirelessHart/6LowPAN) así como evoluciones de protocolos para poder adaptarse a las características singulares de los dispositivos de **IoT**.

Teniendo en cuenta que el modelo principal de evolución de **IoT** son las redes de sensores inalámbricas merece la pena revisar donde encajaría cada una de las piezas que componen esta tecnología.

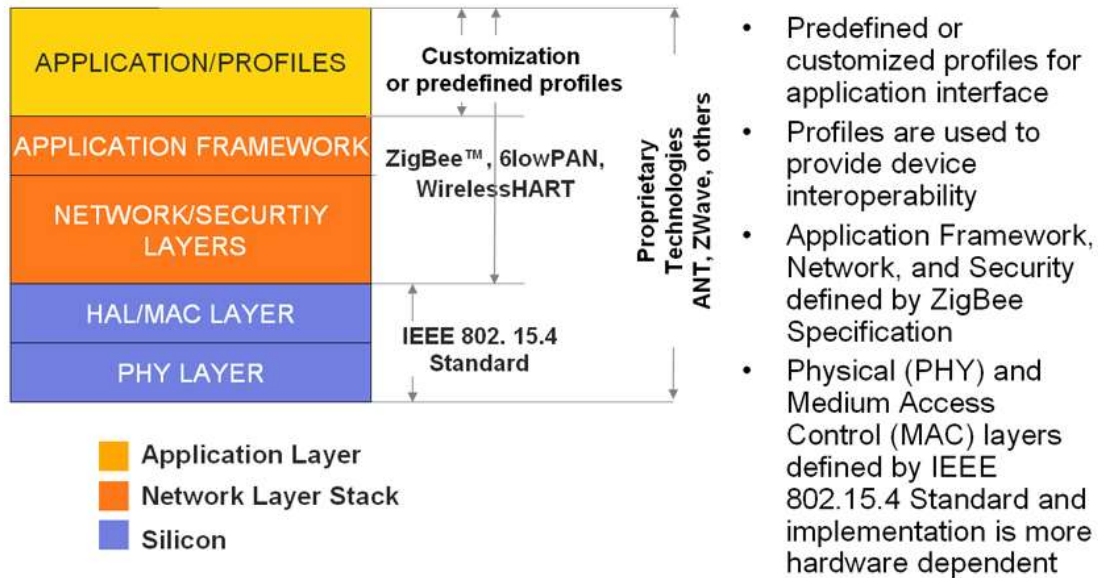


Ilustración 29 Modelo en capas de las redes de sensores inalámbricas

Como se puede apreciar en esta imagen, existen tecnologías propietarias que cubren todas las capas y ofrecen soluciones cerradas, sin embargo como se ha demostrado a lo largo de los años, las soluciones más innovadoras están llegando por el camino de grupos libres y por lo tanto nos centraremos en aquellas tecnologías que permitan su interconexión con otras y sean fácilmente analizables (como 6LowPAN). A continuación procederemos a analizar las capas para una mejor comprensión de la extensión y complejidad de esta tecnología.

## Física y enlace de datos

En 2012 el estándar 802.15.4-2006 fue modificado con el fin de mejorar y añadir funcionalidad al estándar IEEE 802.15.4 MAC. Estas mejoras tuvieron sobre todo dos premisas, la primera de ellas preveía dar un mejor soporte a los mercados industriales y la segunda permitir la compatibilidad con las modificaciones propuestas por el estándar WPAN Chino.

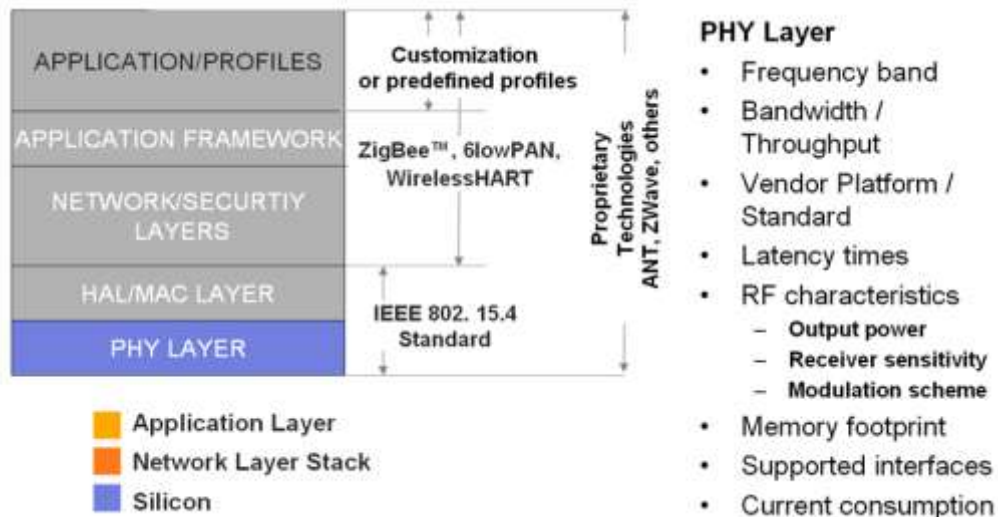


Ilustración 30 WSN Capa Física

Para lograr estos objetivos se propusieron varias mejoras, entre las cuales nos centraremos en 3 principalmente:

- **CSL:** Coordinated Sample Listening.
- **RIT:** Receiver Initiated Transmission.
- **TSCH:** Timeslotted Channel Hopping.

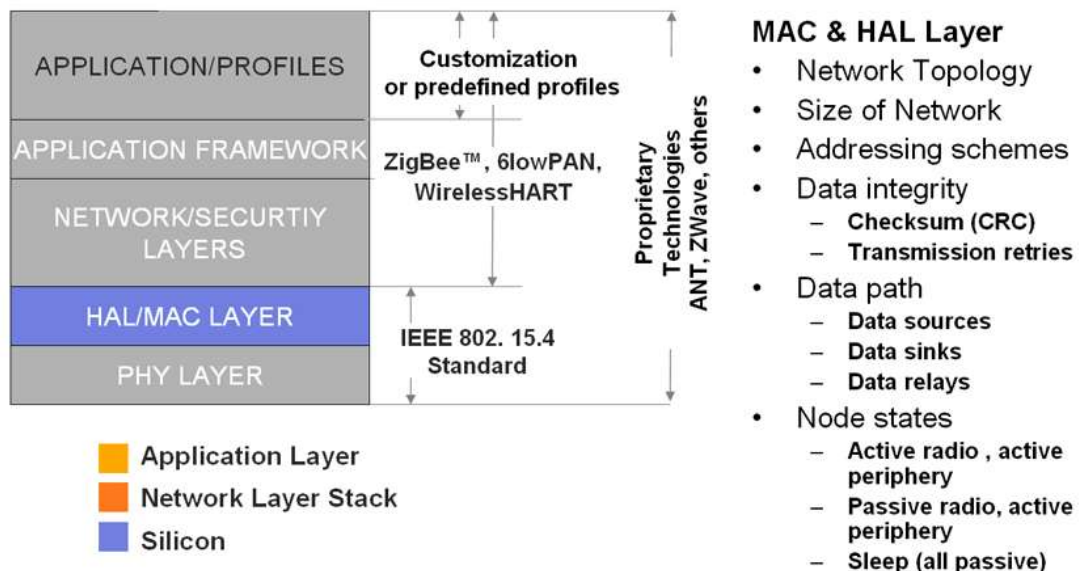


Ilustración 31 WSN capa MAC

## Coordinated Sampled Listening (CSL)

El CSL es un modo de control de acceso al medio de bajo consumo que permite percibir a los nodos como activos permanentemente especificando cómo se gestionará la monitorización de canales de manera periódica en los receptores para la recepción de transmisión en ciclos de trabajo bajos. En este modo el receptor y el emisor se encuentran sincronizados para reducir la sobrecarga de transmisiones.

En el esquema básico de funcionamiento el modo CSL se activa cuando el atributo *macCSLPeriod* pasa a estado no-cero y se desactiva cuando alcanza el estado lógico cero.

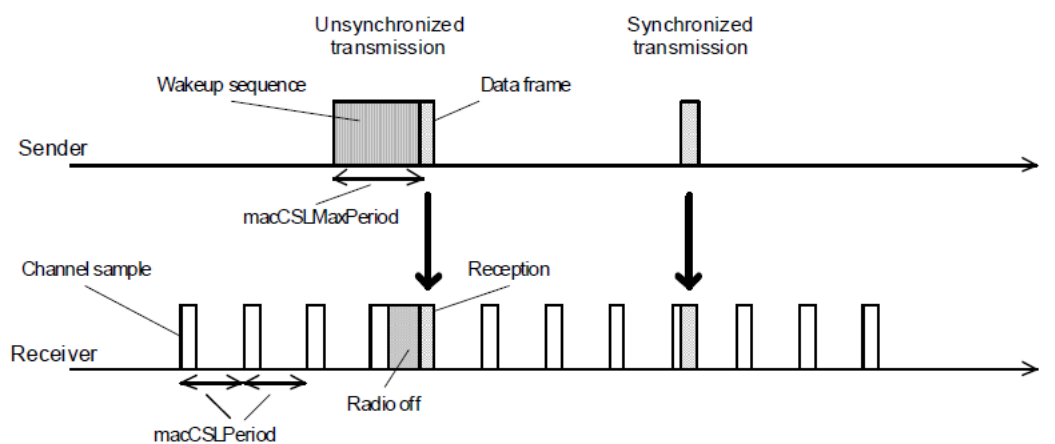


Figure 34o—Basic CSL operations

### Ilustración 32: CSL operaciones básicas

Durante la espera pasiva CSL realiza un muestreo del canal cada periodo de tiempo definido por el atributo *macCSLPeriod*. Se pueden producir tres situaciones en la máquina de estado durante la recepción:

- **El receptor se activa y no detecta energía:** En este caso simplemente pasa al estado de inactividad hasta el siguiente ciclo definido.
- **El receptor se activa, detecta una trama de wake-up y considera que tiene procesarla :**(es el receptor o debe retransmitirla) En esta situación el receptor pasará al modo de espera definido por la trama wakeup con el atributo Rendezvous Time (RZ Time). Este tiempo de espera permite sincronizar la transmisión haciendo que el dispositivo no esté activo hasta el periodo definido. Una vez pasado ese tiempo se activará de nuevo para recibir directamente la trama. Una vez terminada la transmisión comenzará de nuevo el ciclo de espera.



- **El receptor se activa, detecta energía de una señal de wake-up pero no es el destinatario de la trama:** En este caso el receptor pasa de nuevo al modo de espera, dejando transcurrir el tiempo definido en el atributo RZ Time añadiendo también el tiempo de transmisión de trama (espera un ciclo completo de transmisión). Una vez transcurrido ese tiempo comienza de nuevo su ciclo de escucha pasiva.

La trama enviada al receptor puede ser de dos tipos, unicast o broadcast. En el caso de las transmisiones unicast la secuencia de wake-up puede ser larga o corta dependiendo de dos factores:

- **Transmisión asíncrona:** En este caso se desconoce la fase CSL y el periodo del destinatario por lo que la duración de la secuencia de wake-up se define por el parámetro macCSLMaxPeriod (primera secuencia en el ejemplo básico de operación CSL).
- **Transmisión sincronizada:** En este caso la fase y periodo del receptor es conocida por lo que la secuencia de wake-up será solamente el tiempo de guarda definido por la desviación de reloj del receptor, tomado la última vez que se comunicaron.

El caso de las transmisiones broadcast el sistema es prácticamente el mismo, sin embargo solamente es posible realizar transmisiones asíncronas.

### Receiver Initiated Transmission (RIT)

La estrategia RIT es una alternativa de recepción de paquetes de baja energía. Es una estrategia muy sencilla en la que la capa de aplicación del nodo receptor pregunta de manera periódica a un servidor para detectar si hay información pendiente de transmisión. Existen dos modos fundamentales de funcionamiento, el modelo básico es aquel en el que cada macRITperiod el receptor emite un paquete de petición de datos mediante broadcast y espera por un corto espacio de tiempo . (Olivier Hersent, 2011)

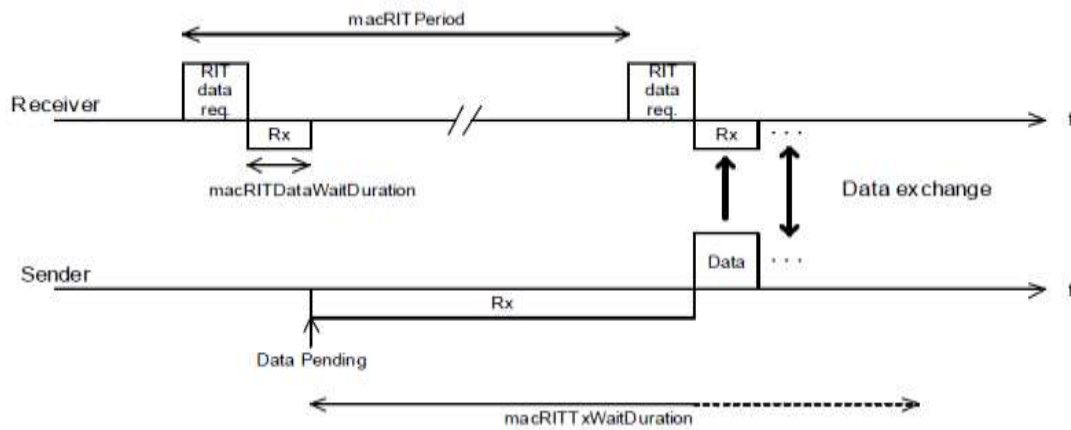


Ilustración 33 RIT, Operación básica

En el segundo modo, la solicitud de transmisión de información incluye información sobre el tiempo hasta la primera escucha, el número de veces que se repiten las escuchas y el intervalo entre las repeticiones.

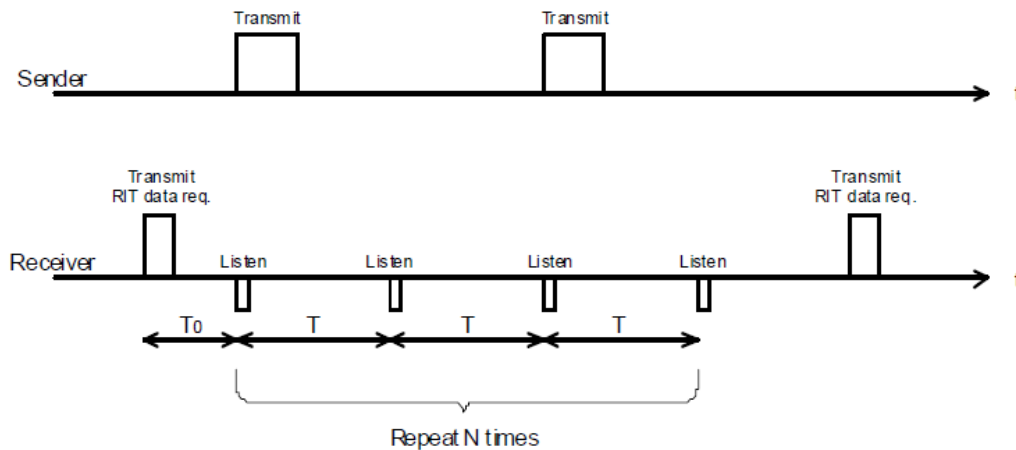


Ilustración 34 RIT: Operación con horario transmitido durante la solicitud de transmisión de datos.

Esta estrategia, tal y como se ha comentado anteriormente, es eficaz a la hora de ahorrar energía, sin embargo añade más latencia que la estrategia CSL y además no soporta comunicación multicast. Como referencia el polling dura aproximadamente 10 ms, por lo tanto para alcanzar un ciclo de trabajo/descanso del 0.05% hacer que el sistema tenga 20s de parámetro *macRITPeriod* lo cual permite su uso principalmente en aplicaciones de sensores en las cuales se puede tolerar una latencia elevada.

### TimeSlotted Channel Hopping (TSCH)

La estrategia TSCH permite por un lado añadir diversidad de frecuencia a otros métodos que también proveen de diversidad (codificación, modulación, retransmisión y

enrutado mesh), mejorando la resiliencia de la red a la polución espectral transitoria, y por otro lado permite que cada enlace nodo a nodo, pueda usar su propio conjunto de frecuencias, facilitando enormemente las selección de canales en entornos con múltiples nodos, ya que no siempre es trivial encontrar un canal que sea utilizable por todos los nodos.

El esquema básico de funcionamiento de las redes PAN TSCH se basa en la emisión de un mensaje mejorado de balizamiento (Enhanced Beacons) al recibir una petición MLME BEACON de una instancia superior. Estas “Enhanced Beacons” contienen :

- Información temporal de manera que los nuevos dispositivos sean capaces de sincronizarse a la red.
- Información sobre el salto de canal.
- Información de la franja temporal en la que se esperan que sean transmitidas las tramas y se esperan las transmisiones de confirmación.
- Enlace inicial e información del slotframe para que los nuevos dispositivos conozcan cuando esperar transmisiones del dispositivo que anuncia y cuando pueden trasmitir al dispositivo anunciante.

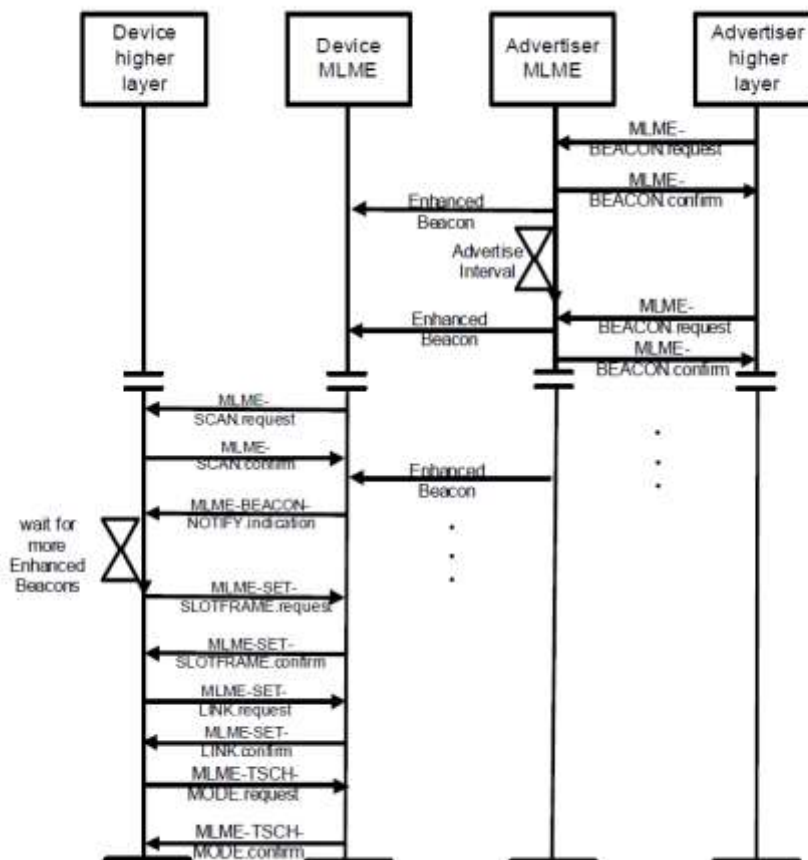


Ilustración 35 Secuencia de mensajes para el procedimiento de encontrar un dispositivo en TSCH

El slotframe contiene como se ha comentado anteriormente los periodos definidos de comunicación entre dispositivos y se repite en base al concepto de tiempo compartido entre los dispositivos de la red. Precisamente gracias a que todos los dispositivos comparten la información del tiempo y canales, es posible para ellos utilizar todo el ancho de canal para evitar los efectos negativos de las interferencias y pérdidas multi-camino, lo cual lo hace ideal para los entornos agresivos industriales.

## Red

Una vez analizados los mecanismos específicos que mejoran la capacidad del IEEE 802.15.4 en cuanto a la capa física y MAC es el momento de analizar las medidas tomadas en la capa de red, aunque hay que tener en cuenta que algunos de los estándares abarcan más de una capa (tal y como se observa en la figura siguiente). Nos centraremos una vez más en los protocolos que ofrecen nuevas funcionalidades.

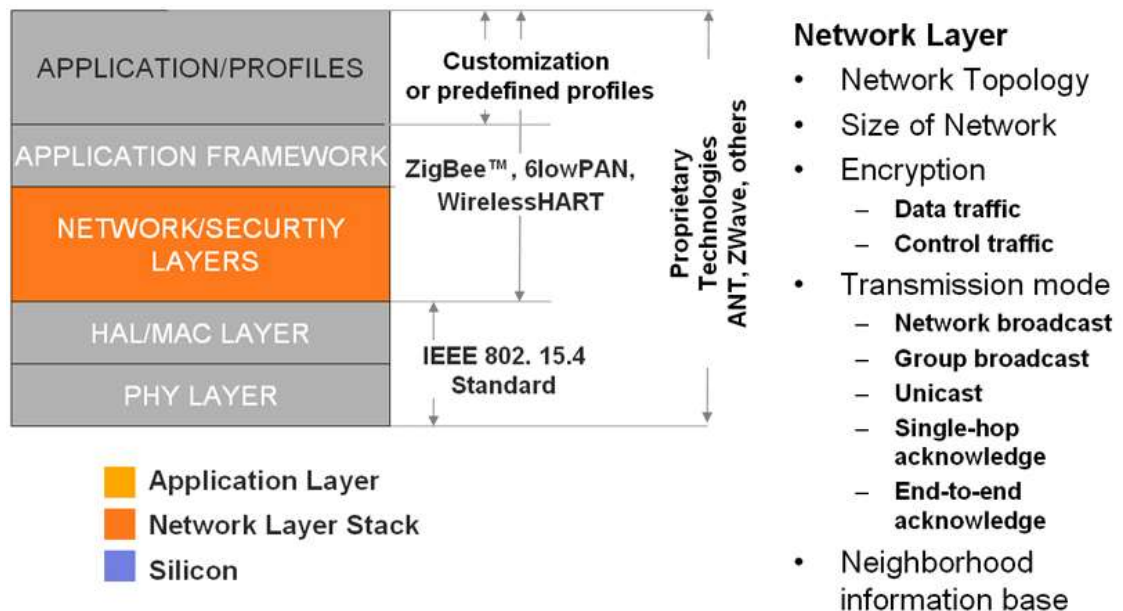


Ilustración 36: Capa de red

## 6LoWPAN

El término 6LoWPAN es un acrónimo que significa “Low power Wireless Personal Area Networks” y fue el nombre usado por un grupo de trabajo del IETF que tenía como meta conseguir dotar a las redes compuestas de dispositivos más pequeños y simples de la capacidad de comunicarse a través del IPv6 (Isam Ishaq, 2013). Conviene recordar que la cabecera MAC en IPv6 requiere 40 bytes, lo cual es claramente un problema para las redes sensoriales de dispositivos de bajo consumo energético.

A continuación se describen las más importantes actuaciones realizadas para dotar de esta capacidad al estándar 802.15.4.

- **Apilamiento de cabeceras:** La RFC4944 estableció que todos los datagramas encapsulados en LoWPAN contengan como prefijo un apilamiento de cabeceras encapsuladas, en las que cada cabecera contenga un 1 tipo de cabecera y cero o más campos. Este se ve claramente en la siguiente figura:

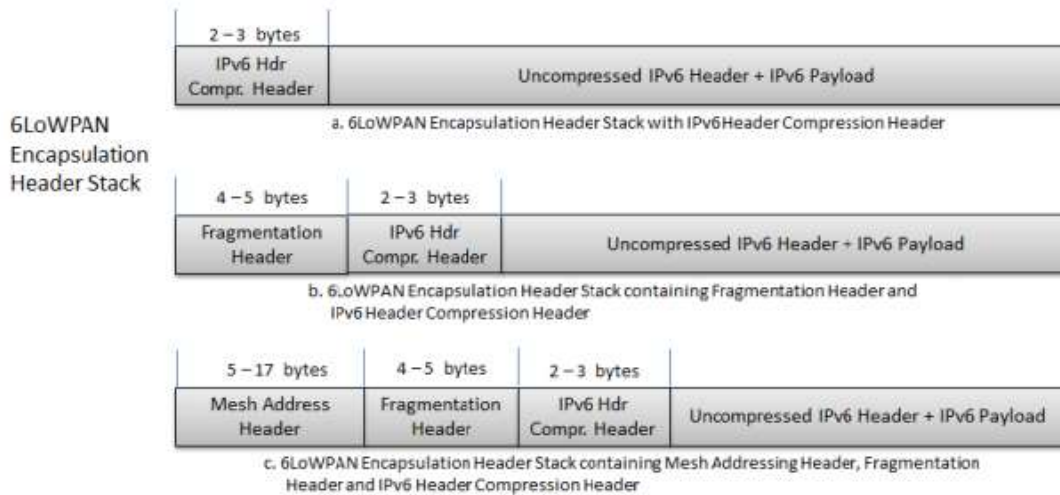
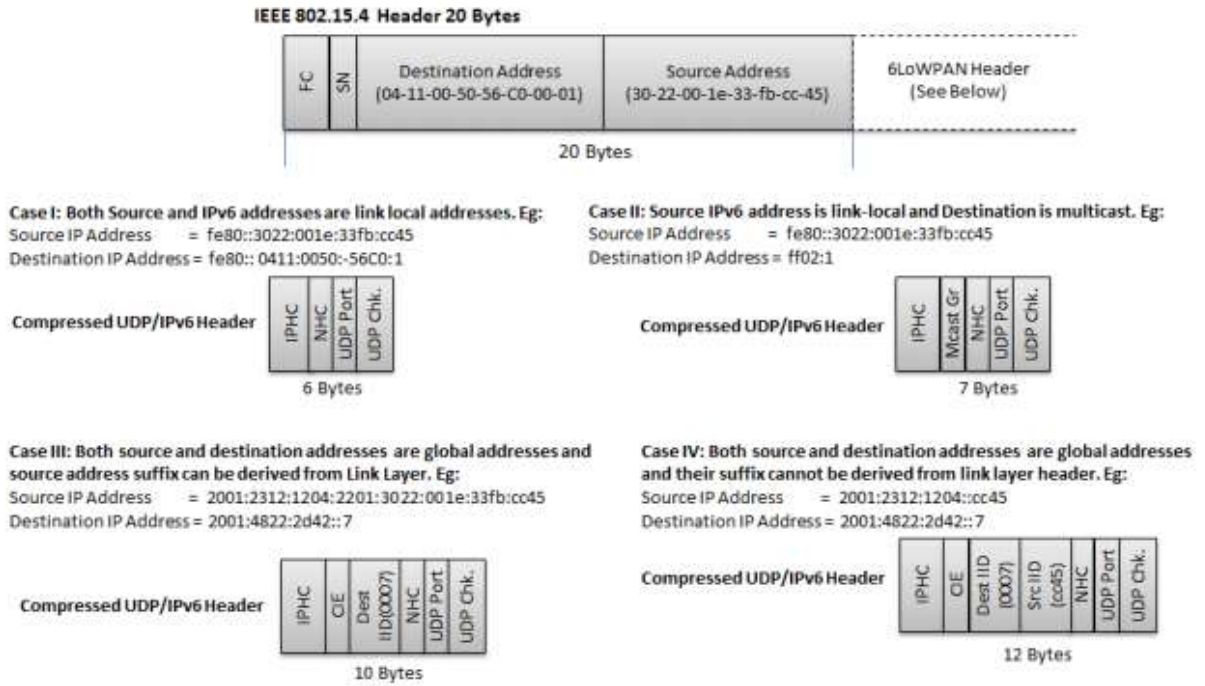


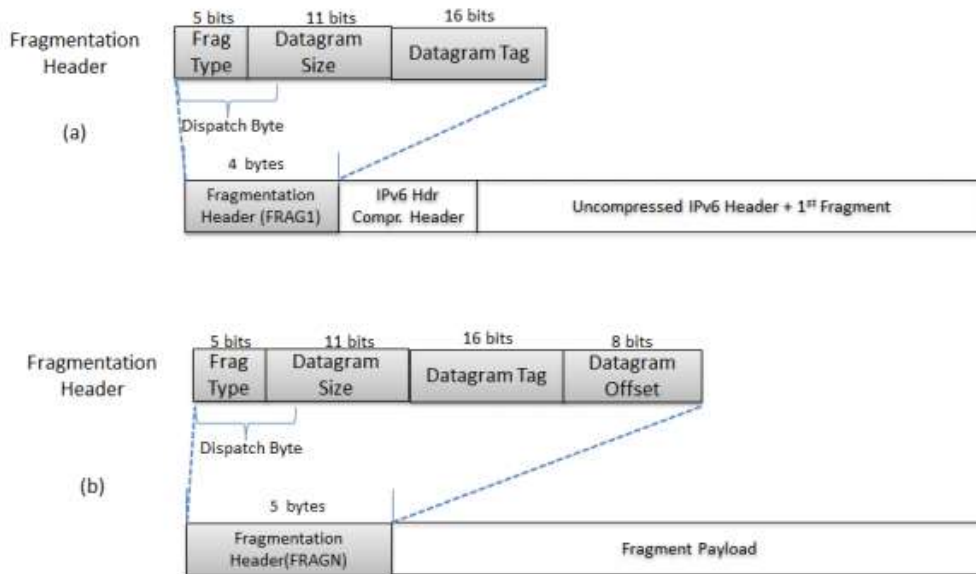
Ilustración 37 6LoWPAN Header Stack

- **Compresión de cabeceras:** La RFC4944 estableció métodos de compresión que permiten comprimir las cabeceras IPv6 y además permite añadir información de otras capas encima de la información IPv6 en una sola trama 802.15.4. El método principal que se definió fue el LOWPAN\_HC1, una técnica optimizada en comprimir paquetes IPv6 en la cabecera. Esta técnica intenta reducir el tamaño de los paquetes enviados suprimiendo campos comunes que se repiten, y también se definió HC2 como método de compresión para la capa de transporte (permitiendo la compresión de TCP,UDP.....).



**Ilustración 38 IPv6 Header compression**

- Fragmentación:** Otro de los servicios añadidos es la fragmentación y ensamblaje de tramas para todas aquellas tramas IPv6 que no puedan ser contenidas completamente en una sola trama IEEE 802.15.4. Este método permite dividir el paquete en varios fragmentos que incluirán su propia cabecera de fragmentación.



**Ilustración 39 6LoWPAN Fragmentation header**

- Soporte de enrutado para redes Mesh:** Se definió una cabecera con la dirección Mesh que contiene las direcciones del iniciador y final. Para realizar el envío de un paquete el iniciador construye la cabecera con su propia información, y usando su propia información de capa 2 identifica el siguiente salto para llegar a su destino, creando de esta manera dos cabeceras. Una de ellas es inmutable y marca el origen y destino final, y la segunda se modifica a medida que se va localizando el siguiente salto, marcando como destino al dispositivo siguiente de la cadena.

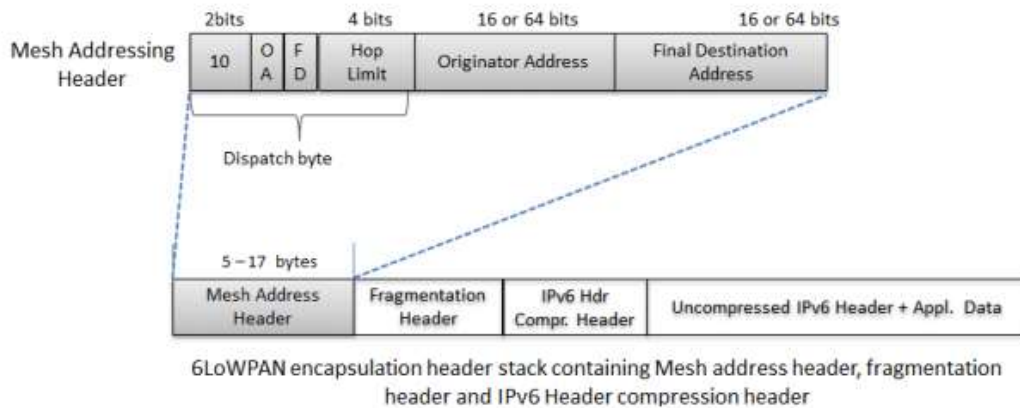


Ilustración 40 6LoWPAN Mesh Address Header

## RPL

El IPv6 Routing Protocol for Low-Power and lossy networks es el estándar para enrutado en redes de bajo consumo y viene a completar el trabajo realizado en el apartado anterior por “6LowPAN”, dotando en este caso de reglas de enrutado para paquetes IPv6. A continuación se resumen las ideas principales :

- Formación de la topología:** Una red que gestione su topología de enturado mediante RPL requerirá una o más instancias RPL. Cada una de estas instancias define una topología que se construye usando una métrica única. En cada instancia pueden existir múltiples DAG (Directed Acyclic Graphs)

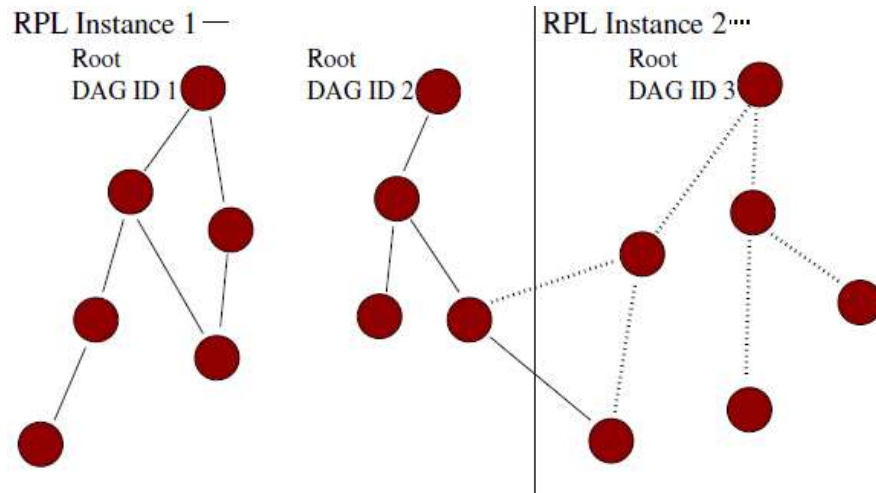


Ilustración 41 RPL Instancias DAG

Podemos hablar de los DAG como estructuras en forma de árbol que se forman enviando un paquete DIO (DAG Information Object) y contienen información de nodos hijos, los cuales si deciden adherirse a ese DAG enviarán el mismo paquete a sus hijos aumentando el rango. El rango es usado para evitar loopings en el sistema. Es importante tener en cuenta que cada nodo no puede pertenecer a varios DAG pero en diferentes instancias.

- **Mantenimiento:** Los DAGs pueden necesitar ser actualizados si la estructura de la red cambia debido a la movilidad o la calidad del enlace se degrada. Para el protocolo RPL ajusta ocasionalmente los DAGs mediante un contador, evitando de este modo muchas actualizaciones redundantes en redes densamente pobladas. En redes en las que se detecten inconsistencias de enrutado (por ejemplo la pérdida de un padre) se produce un reset en el contador a un valor mínimo para poder proceder a una regeneración rápida de la red.
- **Trafico punto a punto:** Para permitir que los nodos puedan comunicarse unos con otros, se incluye en RPL un DAO (Destination Advertisement Object) en el cual los hijos pueden informar de sus propios prefijos a sus vecinos usando multicast o avisar a la raíz DAG usando mensajes unicast una vez unido.

Sin embargo el protocolo RPL (Thubert, 2013) fue diseñado para ser complementado por una función objetivo para completar todos los posibles casos de usos. Esta función será la encargada de unir la métrica y la lógica que optimizará la topología de enrutado para cada caso particular de uso. Para completar esta necesidad se creó el IETF 6TiSCH de manera que fuera posible unir el IETF 6LoWPAN y el IEE 802.15.4e TSCH.



## 6TiSCH

Recientemente se ha formado un grupo en el IETF para lograr enlazar el nuevo protocolo IEEE 802.15.4e TSCH con RPL y 6LowPAN. Este grupo ofrecerá un documento con una arquitectura basada en estándares abiertos que permita alcanzar un grado de rendimiento industrial en términos de latencia, jitter escalabilidad y fiabilidad para la operación del protocolo TSCH sobre IPv6.

Este grupo pretende reusar siempre que sea posible alguno de los protocolos existentes de manera que se reduzca al mínimo el periodo de adaptación. Actualmente está proyecto está en marcha, y todavía no se ha terminado de ofrecer un diseño completo de arquitectura.

## Aplicaciones

En la capa de aplicación se implementaron fundamentalmente dos nuevos protocolos CoAP y MQTT, estando CoAP diseñado para ser capaz de interactuar con la Web mientras que MQTT se diseñó para dotar de flexibilidad a los modos de comunicación y actúa solamente como un transmisor de datos binarios. Pese a que sus funciones son claramente diferente, ambos cuentan con las siguientes características comunes (Jaffey, 2014):

1. Ambos están basados en estándares abiertos.
2. Están mejor adaptados a los escenarios con restricciones típicos de las redes de pequeños dispositivos que HTTP.
3. Disponen de mecanismos para la comunicación asíncrona.
4. Basados en IP.
5. Ambos disponen de una gran variedad de implementaciones.

En cuanto a sus diferencias principales podemos decir que MQTT es un protocolo de comunicación para enviar mensajes principalmente de muchos a muchos, mientras que CoAP está más bien pensado para comunicación 1 a 1.

Otra de sus grandes diferencias es que MQTT realiza conexiones de larga duración TCP a un bróker y CoAP está diseñado para que tanto el servidor como el cliente transmitan en UDP. Además MQTT se puede usar para transmitir cualquier tipo de información sin embargo los clientes deben conocer el formato de antemano, mientras que con CoAP es posible hacer negociación de contenido, permitiendo a los clientes encontrar la manera de recibir la información.

## Message Queue Telemetry Transport (MQTT)

MQTT es un protocolo de comunicaciones del tipo publicar/suscribir para dispositivos ligeros M2M diseñado previamente por IBM y siendo ahora de código abierto.

La arquitectura MQTT está basada en un modelo cliente / servidor donde cada sensor es un cliente que debe conectar a un servidor (bróker) a través de TCP y además está orientada a mensajes, por lo que cada uno de ellos es un paquete de datos opaco para el bróker.

Cada mensaje se publica a una dirección (topic) y los clientes pueden suscribirse a múltiples topics (recibiendo todos aquellos mensajes que se publiquen en los topics suscritos).

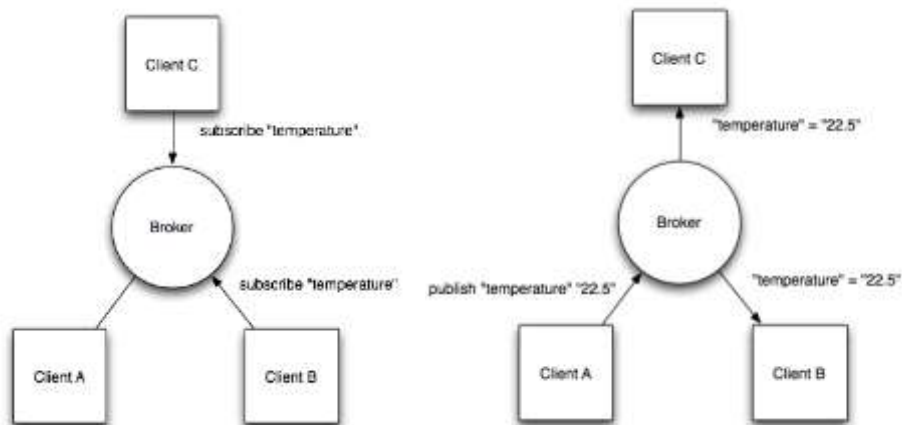


Ilustración 42 MQTT architecture example

De esta manera se puede permitir la comunicación 1 a 1, 1 a varios y varios a 1 de un modo sencillo. A continuación se exponen algunas de las características principales de este protocolo:

- **Selección de topics:** En MQTT los topics son jerárquicos y permiten los comodines a la hora de suscribirse a los canales (pero no a la hora de publicar). De esta manera pueden usar el operador + para suscribirse a un directorio o # para hacerlo a cualquier directorio.
- **QoS a nivel de aplicación:** MQTT soporta tres niveles de servicio que pueden adaptarse dependiendo de la aplicación. Modo “disparar y olvidar” (sin QoS), modo “entregar al menos 1 vez” que permite comprobar que al menos se entrega el mensaje una vez (sin embargo se puede emitir el mensaje y llegar varias veces), “entregar SOLO una vez” en este modo se emite el mensaje pero se obliga a la red a reducir el over-head y entregar el paquete solamente 1 vez.

- **Ultima voluntad y testamento:** Los clientes MQTT pueden registrar un mensaje de despedida que será enviado al bróker (server) su se desconectan, estos mensajes se pueden usar para avisar a los subscriptores que un dispositivo se ha desconectado.
- **Persistencia:** MQTT dispone de soporte para que los mensajes se almacenen en el bróker, de manera que cuando se publican los mensajes los clientes pueden solicitar que el mensaje se mantenga, así, cuando otro cliente se suscriba recibirá los mensajes guardados (solamente se puede guardar el último mensaje con orden de guardado).
- **Seguridad:** Los servidores/brokers MQTT pueden requerir usuario/contraseña para autenticación del cliente, y además la conexión TCP puede ser encriptada mediante SSL/TLS.
- **MQTT-SN:** Por último, pese a que MQTT está diseñado como un protocolo ligero, existen dispositivos que no disponen de potencia suficiente para manejar TCP o en los que la pérdida de paquetes sea muy alta. También hay que tener en cuenta que los nombres de los topics a veces resultan demasiado largos, por lo que se diseñó un mapeado UDP y añade en el servidor soporte para indexar los nombres de los topics.

### Constrained Application Protocol (CoAP)

Este protocolo es al igual que HTTP un protocolo de transferencia de documentos, sin embargo CoAP está diseñado pensando en las necesidades de dispositivos con poca capacidad de procesado o memoria. Para conseguir que los paquetes sean mucho más pequeños que los flujos HTTP sobre TCP, se utiliza de manera extensiva un mapeo de carácter a entero (lo cual ahorra espacio) y demás se ha conseguido que este proceso no requiera un aumento del consumo de memoria.

Otra de las características que permiten que sea más ligero que HTTP es que corre sobre UDP en vez de TCP, conectando servidor y cliente a través de datagramas sin conexión, implementando los reintentos y la reordenación en la capa de aplicación. Gracias a la eliminación de la necesidad de TCP es posible dotar de capacidad IP a dispositivos con muy poca potencia de procesado.

Al igual que MQTT CoAP hace uso de un modelo cliente/servidor y además al estar basado en datagramas, se puede usar por encima de SMS o cualquier protocolo de comunicación basado en paquetes. Algunas de las características que lo identifican son:

- **QoS a nivel de aplicación:** Dispone de dos modos, con confirmación o sin confirmación. En el primero de ellos los receptores de los mensajes deben enviar confirmación mediante un paquete ack, mientras que los no requieren confirmación son del tipo de emitir-olvidar.

- **Negociación de contenido:** Los clientes CoAP son capaces al igual que con HTTP de realizar negociación de contenido, de manera que los clientes pueden enviar mensajes de aceptación este responder con mensajes del tipo “Content-type” explicando al cliente que es el contenido que reciben.
- **Seguridad:** Al estar construido sobre UDP no está disponible la comunicación SSL/TLS, por lo que se diseñó con DTLS, el cual permite dotar a UDP de las mismas seguridades que TCP. Normalmente los dispositivos que soportan DTLS suelen a su vez soportar AES, RSA o ECC y AES.
- **Observación:** CoAP extiende el modelo de petición de recursos HTTP mediante la posibilidad de observar un recurso, permitiendo que una vez terminada la descarga el servidor siga contactando con el cliente para notificarle si hay algún cambio.
- **Descubrimiento de recursos:** Otra característica de CoAP es que los servidores proveen de una lista de ficheros con metadatos en una dirección conocida, de manera que los clientes pueden descubrir fácilmente cual es el contenido de los server y el tipo de datos que contienen.

## Tecnologías para IEEE 802.15.4

Una vez analizados los protocolos que definen el estándar se recogen algunos de los fabricantes de hardware y software que actualmente están ofreciendo soluciones para el estándar IEEE 802.15.4. Hay que tener en cuenta que existen múltiples alternativas de fabricantes con tecnología propietaria, sin embargo, se pretende sobre todo dar una idea general de las capacidades posibles de adaptación de todos los protocolos para ofrecer soluciones a los campos requeridos, tales como Smart grid, Smart cities etc etc...

En un primer análisis se hace un recorrido por los diferentes suministradores de hardware con algunas de sus características principales, mientras que en un segundo momento se procede a un breve análisis del software implementado para dotar al conjunto de aplicación real.

## Hardware

### TelosB

La plataforma de código abierto TelosB fue diseñada por la UC Berkeley para ofrecer capacidades de experimentación de última generación para el desarrollo de investigaciones de Low Power o simplemente como plataforma de experimentación de redes de sensores inalámbricos.

El componente principal de esta plataforma es el nodo TelosB mote WSN TPR2420, una placa que incluye lo esencial para iniciar tareas de investigación en laboratorio en un solo dispositivo. Algunas de sus características son:



Ilustración 43 TelosB plataforma

- Receptor de radio compatible con IEEE 802.15.4. y antena incorporada que emite en la banda compatible con ISM de 2.4 a 2.4835 GHz,
- Velocidad de transmisión de hasta 250 kbps.
- Microcontroladora TI MSP 430 con 10 kB de RAM .
- Bajo consumo de energía y alimentación mediante dos pilas AA. Es posible alimentarlo mediante USB durante la programación o conectado a un pc.
- 1MB de flash externa para registro de datos.

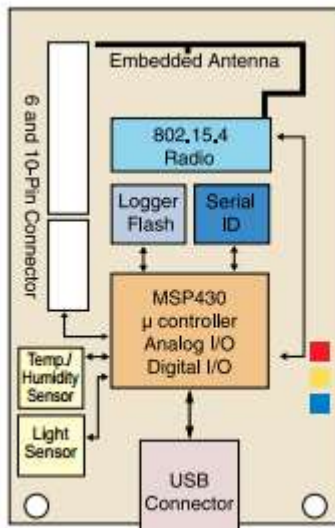


Ilustración 44: Esquema físico TelosB

- Programación y acceso a los datos mediante USB.
- Colección amplia de sensores acoplables además de los disponibles integrados : luz, temperatura y humedad.
- Compatible con el sistema operativo TinyOS 1.1.11 o superior.

Esta plataforma está optimizada para que los sensores sean sencillamente accesibles y por lo tanto la hace ideal para realizar comparaciones entre diferentes protocolos, ajustando varias placas con diferentes configuraciones es posible realizar un estudio comparativo del rendimiento de cada protocolo en las situaciones establecidas.

Una de las grandes ventajas de esta plataforma es su precio considerando las aplicaciones y los sensores integrados que dispone, todo ello con un muy bajo consumo de energía convirtiendo la plataforma en un perfecto demostrador de

tecnologías y una de las plataformas con más posibilidades para el estudio de rendimiento de los diferentes protocolos.

### Z1 de Zolertia

La plataforma Z1 ha sido desarrollada por la compañía Zolertia con base en Barcelona. Al igual que la plataforma anterior esta es una plataforma de desarrollo para redes de sensores inalámbricos con fines de investigación fundamentalmente y comparte muchas de sus características. Sin embargo el producto final puede ser usado también en entornos de producción ya que dispone de carcasa protectora.



**Ilustración 45** Plataforma de iniciación Z de Zolertia

- Dispone de un radio transmisor ampliamente usado (CC2420) y compatible tanto IEEE 802.15.4 como con 6LoWPAN y ZigBee.
- Dispone de antena integrada, sin embargo es posible instalarle una antena externa.
- Dispone de una micro controladora MSP430 de segunda generación de 16 bits y ultra bajo consumo.
- Disponible con alimentación mediante USB, baterías (2 x AA o 2x AAA) e incluso pila de moneda.
- Dos sensores integrados: acelerómetro de 3 ejes y sensor de temperatura.
- Compatibilidad con el sistema operativo TinyOS y Contiki.
- Disponibles sensores de : humedad, luz ambiental, barómetros en modo digital, y soporta todos los sensores phidgets analógicos del mercado (Phidgets,

2014).

- Capacidad de programación mediante puerto USB.

El coste de esta plataforma es bastante superior a los de la plataforma TesloB, sin embargo está mucho más próxima a un producto final que la anterior, siendo más sencilla la instalación y uso por parte de un cliente final (y no un desarrollador).

### OpenMote-CC2538

La plataforma OpenMote ha sido desarrollada por la empresa con el mismo nombre y con base en Granollers (España). Esta plataforma ha alcanzado el grado de madurez necesario para poder ser considerada una plataforma apta para entornos de producción.

Uno de los puntos más característicos de esta plataforma es el hecho de ser un sistema modular, estando el conjunto formado por tres módulos. La plataforma base incluye el sistema de RF y tiene un tamaño y consumos muy reducido, y al conectarla a un módulo de baterías (con el cual se comunica mediante cabeceras Xbee) permite el funcionamiento de manera autónoma. Este módulo auxiliar está dotado a su vez de tres sensores digitales (luz, temperatura y de aceleración).

Para completar la plataforma el sistema se puede conectar a un módulo denominado OpenBase. Este módulo cumple tres funciones diferentes, la primera de ellas permite la programación y depuración del código base con soporte completo de puntos de ruptura mediante una sonda con un conector estandarizado ARM JTAG. La segunda funcionalidad añadida permite la comunicación de la plataforma con un PC mediante conexión serie o USB y por último dispone de un interface Ethernet 10/100 permitiendo de esta manera conectar el dispositivo a internet actuando como router.

El sistema base de esta plataforma dispone de las siguientes características:

- Dispone de un radio transmisor CC2520 que emite a 2.4 GHz y totalmente compatible con el estándar 802.15.4.
- Micro controladora CC2538 de Texas Instrument de 32 bit a 32MHz, 32 Kbytes de RAM y 512 Kbytes de memoria flash.
- Dispone de conector para acoplamiento de antena (no dispone de antena integrada).
- Programación mediante un módulo adicional que permite funcionalidades de depuración avanzada (módulo OpenBase).
- Alimentación mediante el módulo OpenBattery para operación autónoma.

En cuanto al software soportado, esta plataforma está adaptada a su uso con Contiki, OpenWSN, RIoT y FreeRTOS. Gracias a la combinación de software y hardware esta plataforma es capaz de hacer uso de protocolos como TSCH, 6LowPAN, CoAP etc etc...

### @ANY de Adaptative Network Solutions

La compañía Adaptative Network Solutions con base en Saxoni (Alemania) dispone de una plataforma completa de soluciones basada en el estándar de comunicaciones 802.15.4 (Adaptative Network Solutions, 2014) y tecnologías tales como Zigbee y 6LowPAN. Dispone de dos gamas de soluciones, una para la banda de 2.4 GHz y otra con emisores en la banda inferior a 1 GHz, siendo su única diferencia el emisor de RF.

Los módulos siguen el mismo diseño que otras compañías, siendo muy compactos y con especial énfasis en el bajo consumo. Para la programación la plataforma ofrece un módulo adicional que permite realizar las tareas de programación y depuración.

- Dispone de un radio transmisor RF6555 que emite a 2.4 GHz y totalmente compatible con el estándar 802.15.4 en su versión a 2.4GHz o AT86RF212 también compatible en su versión en la banda sub 1GHZ.
- Micro controladoras ATmega128RFA1 o Atmega1281V de Texas Atmel de 16 bit a 16MHz, 16 Kbytes de RAM y 256 Kbytes de memoria flash.
- Dispone tanto de antena interna como de adaptador de conexión de antena externa.
- Programación mediante un módulo adicional que permite funcionalidades de depuración avanzada (módulo Brick).
- Alimentación mediante el módulo de desarrollo Brick para operación autónoma.

El sistema completo está formado por 3 elementos principalmente. El primer módulo es el módulo de comunicación de la plataforma @any que han sido diseñados pensando en el minimizar el consumo, con un diseño muy compacto y procurando al tiempo reducir el tiempo de implantación al mercado con un producto totalmente desarrollado y listo para su uso.

En segundo lugar el sistema dispone de una plataforma de desarrollo para aquellas aplicaciones que requieran modificaciones o adaptación mediante el módulo "the Brick". El módulo de desarrollo está alimentado por dos baterías y dispone de un sensor integrado de temperatura. El diseño está optimizado para permitir realizar pruebas con diferentes topologías de red, siendo esta la mejor alternativa para realizar programación y depuración de aplicaciones.



Por último, esta plataforma se completa con dispositivos del tipo dongles USB que permiten el acceso a la línea de comandos AT de los módulos mediante un puerto virtual COM, incluyendo además un inerfaz JTAG para programación de los circuitos y depuración de errores.

En cuanto al software esta compañía ha pretendido también seguir un diseño modular, sin embargo las opciones son bastante limitadas debido sobre todo al uso de tecnología propietaria ( al contrario que en las demás opciones disponibles). En concreto está basado en una suite denominada @ANY Smart MAC Suite (SMS). Esta suite se suministra en dos opciones (base y Pro), sirviendo la primera para topologías sencillas y como demostrador de tecnología, o la versión Pro que está adaptada para el desarrollo de aplicaciones complejas que requieran una topología avanzada de red. Ambas versiones se pueden completado con un sistema de monitorización también propietario.

El coste de esta plataforma es bajo, sin embargo hay que tener en cuenta que de todas las opciones presentadas esta es la que tiene menor grado de adaptación al ser necesario el uso de tecnología propietaria con los riesgos que eso conlleva.

## Software

En esta sección se analizarán los principales software libres disponibles en el mercado, haciendo hincapié sobre todo en aquel software capaz de soportar los últimos protocolos disponibles como 6LowPAN, CoAP. Esta sería la última capa de los sistemas y permitiría junto a todos los elementos descritos anteriormente montar un sistema completo para **IoT**.

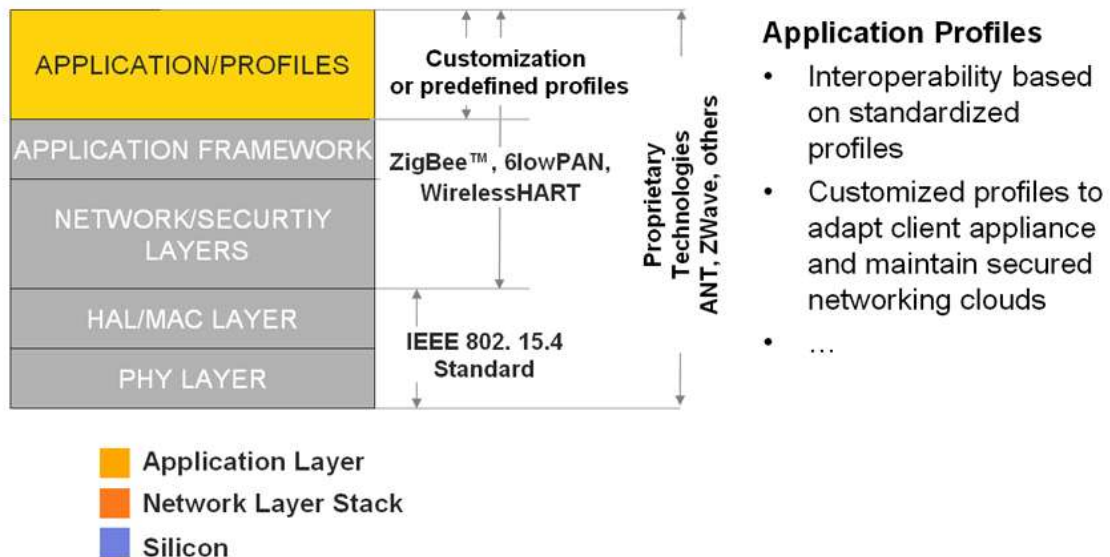


Ilustración 46: Capa de Aplicación

## Contiki

Uno de los software libres con mayor penetración en dispositivos **IoT** es Contiki. Esta especialmente diseñado principalmente para conectar micro controladoras de muy bajo consumo y bajo coste con internet, todo ello respetando los estándares de comunicación de **IoT**, como IPv6, IPv4, 6LowPAN, RPL, CoAP. Otra de las características que definen a Contiki es la sencillez de desarrollo de aplicaciones al ser escritas en C y disponer de un simulador de redes que permite emular el diseño antes de ser impreso en el hardware. (Contiki, 2014)

Algunas de las características de este sistema operativo son:

- **Eficiencia en la gestión de memoria:** Al estar diseñado para sistemas con tan solo unos cuantos KBytes libres dispone de varios mecanismos para ayudar con la gestión y manejo de memoria.
- **Integración completa con redes IP:** Contiki provee de una capa completa de red IP, soportando tanto los protocolos comunes tales como UDP, TCP y HTTP como los nuevos estándares como 6LowPAN, RPL y CoAP.
- **Gestión de consumo de energía:** Para ayudar al desarrollo de los sistema de bajo consumo que requieren funcionar durante años con un par de baterías, Contiki dispone de varios mecanismos para estimar el consumo energético y ayudar de esta manera a identificar los puntos críticos de consumo.
- **Cargador dinámico de módulos:** Otra de las características interesantes de Contiki es que dispone de soporte para modificar el comportamiento de los sistemas incluso después de la implantación mediante un cargador de módulos que puede cargar, recolocar y enlazar ficheros.
- **Simulador de red Cooja:** Uno de los puntos más críticos a la hora de desarrollar software para **IoT** proviene de depurar aplicaciones en instalaciones con un alto número de dispositivos. Contiki provee de un simulador que facilita la tarea de desarrollo y depuración de errores sin ser necesario realizar la impresión final del software en el dispositivo.

- **Plataformas de Hardware soportadas:** Contiki está pensado para dar soporte a una gran variedad de hardware.

| MCU/SoC                   | Radio              | Platforms                                                                                               | Cooja simulation support |
|---------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| RL78                      | ADF7023            | <a href="#">EVAL-ADF7023DB1</a>                                                                         | -                        |
| TI CC2538                 | Integrated         | <a href="#">cc2538dk</a>                                                                                | -                        |
| TI MSP430x                | TI CC2420          | <a href="#">exp5438</a> , <a href="#">z1</a>                                                            | Yes                      |
| TI MSP430x                | TI CC2520          | <a href="#">wismote</a>                                                                                 | Yes                      |
| Atmel AVR                 | Atmel RF230        | <a href="#">avr-raven</a> , <a href="#">avr-rcb</a> , <a href="#">avr-zigbit</a> , <a href="#">iris</a> | -                        |
| Atmel AVR                 | TI CC2420          | <a href="#">micaz</a>                                                                                   | Yes                      |
| Freescale MC1322x         | Integrated         | <a href="#">redbee-dev</a> , <a href="#">redbee-econotag</a>                                            | -                        |
| ST STM32w                 | Integrated         | <a href="#">mb851</a> , <a href="#">mbxxx</a>                                                           | -                        |
| TI MSP430                 | TI CC2420          | <a href="#">sky</a> , <a href="#">jcreate</a> , <a href="#">sentilla-usb</a>                            | Yes                      |
| TI MSP430                 | TI CC1020          | <a href="#">msb430</a>                                                                                  | -                        |
| TI MSP430                 | RFM TR1001         | <a href="#">esb</a>                                                                                     | Yes                      |
| Atmel Atmega128 RFA1      | Integrated         | <a href="#">avr-atmega128rfa</a>                                                                        | -                        |
| Microchip pic32mx795f512l | Microchip mrf24j40 | <a href="#">seed-eye</a>                                                                                | -                        |
| TI CC2530                 | Integrated         | <a href="#">cc2530dk</a>                                                                                | -                        |
| RC2300/RC2301             | Integrated         | <a href="#">sensinode</a>                                                                               | -                        |
| 6502                      | -                  | <a href="#">apple2enh</a> , <a href="#">atari</a> , <a href="#">c128</a> , <a href="#">c64</a>          | -                        |
| Native                    | -                  | <a href="#">native</a> , <a href="#">minimal-net</a> , <a href="#">cooja</a>                            | Yes                      |

Ilustración 47: Tabla Hardware compatible Contiki

- **Rime Stack:** Para aquellas situaciones en las que el uso de la pila completa IPv6 es demasiado para las funciones necesarias, Contiki ofrece una pila de red inalámbrica simple que permite operaciones simples tales como envío de mensajes broadcast, unicast así como algunos mecanismos algo más complejos.

La gran cantidad de hardware soportado así como la flexibilidad de poder usar las pilas Ipv4, Ipv6 o la pila Rime cuando el sistema lo requiere, así como que es una plataforma de software libre con desarrollo comunitario hace que sea una de las alternativas más potentes en el desarrollo de aplicaciones de IoT y con mayor futuro.

## OpenWSN

Este proyecto fue iniciado en 2010 por Thomas Watteyne de la Universidad de Berkeley's en California (USA), y gracias al desarrollo del IETF 6TiSCH se ha convertido actualmente en la punta de lanza tecnológica en cuanto a sistemas operativos para **IoT** al ser el primer sistema que incorpora soporte completo para este estándar (OpenWSN , 2014).

Este proyecto se diseñó con la intención de proveer de un sistema operativo con soporte para todas las capas del modelo OSI mediante los últimos avances en cuanto a estandarización. De esta manera la pila de protocolos soportados completa es la siguiente:

- **Capa física** IEEE 802.15.4-2006.
- **Capa de acceso al medio** IEE 802.25.4e.
- **Capa de adaptación** IETF 6LowPAN.
- **Capa IP/Enrutado** IETF RPL.
- **Capa de transporte** UDP/TCP.
- **Capa de aplicación** CoAP/HTTP.

Si tuviéramos que definir el elemento principal diferenciador de este SO podemos claramente decir que es la implementación de TSCH como protocolo de acceso al medio, convirtiendo a OpenWSN en el máximo representante en cuanto a tecnología punta.

### Características:

- **Capa completa de protocolos:** Tal y como se ha comentado este SO se ha diseñado con un diseño en capas de protocolos que se añaden una encima de otra para proveer de un modelo completo.
- **Uso de TSCH:** Este protocolo permite un aumento muy importante en cuanto a la robustez contra interferencias externas y contra las pérdidas por entornos multi camino, y todo ello siendo compatible con el hardware antiguo compatible con IEEE 802.15.4.
- **OpenVisualizer:** Herramienta escrita en Python de código abierto que permite conectar la red OpenWSN a internet mediante un interface virtual (Linux / Windows), permitiendo enviar y recibir datos y estados de los dispositivos conectados a la red. Permite la compresión de protocolos 6LowPAN/IPv6 y el cálculo de ruta RPL.

- **Módulo CoAP:** Dispone de una librería Python con CoAP así como de soporte CoAP en los propios motes.
- **EndPoint:** Programa en Python que permite comunicar los motes con un ordenador, realizando las funciones de recogida y publicación de datos (normalmente en un puerto UDP). Su ciclo normal es , escucha un paquete (normalmente UDP), le imprime fecha y se pasa a un parser, el cual lo pasa a otro sistema para publicar, los cuales deciden que datos publicar.
- **Soporte de Hardware:** Este software incluye soporte desde las antiguas plataformas de 16 bits hasta los últimos dispositivos de 32 bits. Aproximadamente el 90% del código es independiente de la plataforma, y tan solo el 10% depende del hardware utilizado.

- TelosB
- GINA
- WSN430
- Z1
- OpenMoteCC2538
- OpenMoteSTM
- SAM R21 Xplained Pro
- USP Mote MC13213
- USP Mote CC2538
  - CoAP server specification for motes with sensor board
  - Sensor board and mote communication protocol (draft 8)
- IoT-LAB\_M3
- AgileFox
- experimental
  - OpenMoteHack
  - K20hack
  - USP/SC Motes
  - eZ430-RF2500
  - Current Monitor
  - XpressoHack
- more

Ilustración 48: OpenWSN Hardware support

Por último cabe destacar también algunas funciones complementarias, como por ejemplo el asignador automático de direcciones de 64 bits que requiere IEEE 802.15.4, ya que las radios Atmel no disponen de ese identificador, o por ejemplo de la capacidad de modificar fácilmente la potencia de salida. Todo ello nos da una idea de la magnitud y complejidad del proyecto que da soporte a las nuevas tecnologías.

## RIoT

**RIOT** es otro de los nuevos sistemas operativos diseñados para **IoT** de manera específica. Está diseñado en base a una arquitectura con un micro-kernel similar a Linux pero totalmente adaptado a las características de los dispositivos de **IoT**, como son el bajo consumo y una limitada capacidad de memoria y procesamiento. A continuación se exponen algunas de las principales características de este sistema operativo (Riot, 2014):

- **Compatibilidad** total con los protocolos **IoT**, desde IPv6, 6LowPAN, RPL, TCP, UDP, CoAP y CBOR.
- **Facilidad de desarrollo**: Este sistema operativo se ha diseñado procurando facilitar la labor de los desarrolladores, siendo hasta la fecha el único con soporte completo para C y C++.
- **Facilidad de compilación**: Incluye herramientas estándar de compilación como gcc, gdb y valgrind.
- **Diseño de arquitectura microkernel**: Fiabilidad y flexibilidad gracias al diseño de arquitectura similar a Linux.
- **Programación multihilo**: Hasta la fecha es el único sistema operativo con capacidad de ejecución multihilo de bajo consumo, con menos de 25bytes por hilo.
- **Capacidad de funcionamiento en tiempo real**: El SO se ha diseñado con una latencia de interrupción ultra-baja (50 ciclos de reloj aprox.) y con un sistema de gestión de prioridades.
- **Gestión de memoria estática y dinámica**: Se permite la distribución de la memoria de manera estática y dinámica, facilitando la programación y aumentando la variedad de aplicaciones.

| OS      | Min RAM | Min ROM | C Support | C++ Support | Multi-Threading | MCU w/a MMU | Modularity | Real-Time |
|---------|---------|---------|-----------|-------------|-----------------|-------------|------------|-----------|
| Contiki | < 2kB   | < 30kB  | ✗         | ✗           | ✗               | ✓           | ✗          | ✗         |
| Tiny OS | < 1kB   | < 4KB   | ✗         | ✗           | ✗               | ✓           | ✗          | ✗         |
| Linux   | ~ 1MB   | ~ 1MB   | ✓         | ✓           | ✓               | ✗           | ✗          | ✗         |
| RIOT    | ~ 1.5kB | ~ 5kB   | ✓         | ✓           | ✓               | ✓           | ✓          | ✓         |

Ilustración 49: Comparativa de SO según RIoT

Tal y como se aprecia en la figura anterior, este SO se ha diseñado pensando en ofrecer algunas características diferenciadores importantes para separarlo de sus competidores. Claramente el soporte C++, la cantidad mínima de ROM y su capacidad multihilo podrían ser los elementos que llevarán a los desarrolladores a escoger este tipo de SO.

## Conclusiones

A lo largo de este trabajo se ha realizado un análisis del estado actual de implantación de **IoT** en el mundo. Tal y como se ha podido observar en la primera parte del trabajo existen multitud de aplicaciones en las cuales es posible utilizar a día de hoy dispositivos de **IoT**, sin embargo también se ha podido demostrar como el mercado está totalmente fragmentado debido precisamente a la amplitud de los usos detectados.

Este tal vez sea el mayor problema y al mismo tiempo la mayor virtud de **IoT**. Por un lado se ha quedado claro que existen actualmente multitud de aplicaciones en el mundo real, y que de sus futuras interacciones entre ellas harán que el crecimiento en cuanto al número de aplicaciones sea prácticamente ilimitado.

Por otro lado, precisamente esta infinidad de aplicaciones hace que exista cierta complejidad para las compañías a la hora de ofrecer soluciones en varios ámbitos de aplicación debido a la segmentación, lo cual limita en cierta medida el crecimiento de **IoT**, ya que el nivel de inversión para cubrir varios campos es demasiado alto para una starter por ejemplo, y al centrarse en un solo campo de aplicación las tecnologías usadas están altamente especializadas en ese rango/frecuencia de uso concreto (en vez de alcanzar diseños interoperables).

Una vez analizadas las aplicaciones, se han repasado las tecnologías actuales que permiten ofrecer soluciones a día de hoy, obteniendo de nuevo las mismas conclusiones que al analizar las aplicaciones, la gran cantidad de tecnologías en el mercado y la ausencia de interconexión entre la mayoría de ellas hacen que el aumento de **IoT** siga manteniéndose en una curva lineal.

Para poder realizar el cambio de tendencia en el crecimiento que todas las grandes compañías vaticinan y pasar a una gráfica de crecimiento exponencial será necesario romper la segmentación de los mercados en “silos” y permitir la interconexión de las diferentes aplicaciones y utilidades de manera que “todo esté conectado con todo”.

Esto solo será posible cuando los dispositivos que actualmente no se encuentran conectados a internet lo estén, por lo tanto, las tecnologías candidatas se pudieron reducir en gran medida a las de corto alcance, ya que en la actualidad los objetos con menos porcentaje de acceso a internet son precisamente aquellos situados en los últimos 100 metros de la red.

Gracias a esta premisa fundamental y de otras que se han podido discernir, tales como bajo precio y consumo, la seguridad y la facilidad de uso se han ido desgranando tecnologías hasta localizar aquellas posibilidades reales de liderar el cambio tecnológico que debe producirse para llegar a los 50 billones de dispositivos previstos.

Con todos esos parámetros se han conseguido discernir las tres tecnologías llamadas a liderar el cambio en el modelo de **IoT**. Estas han sido, **WiFi**, **Bluetooth** **Low Power**, y **802.15.4** con sus evoluciones. De estas tres tecnologías **Bluetooth** y



802.15.4 son las que cumplen con más garantías las premisas descritas, dejando la tecnología **WiFi** tal vez un poco relegada a tareas de proxy, dependiendo del marco de aplicación y los requerimientos.

Las dos tecnologías seleccionadas cumplen todos los requisitos y se adaptan perfectamente a los escenarios previstos futuros de uso de **IoT**, sin embargo, la opción de la solución Bluetooth (pese a ser la que tiene a priori el mejor escenario en cuanto a penetración de mercado al estar presente en los hogares desde hace tiempo), presenta el inconveniente de ser una solución cerrada propietaria, por lo que el espacio para el crecimiento tal vez se vea en cierta medida limitado. Estos factores unidos a que las redes de sensores están enfocándose al uso del estándar 802.15.4 hacen que al final el resto del trabajo se centre precisamente en esta solución.

Una vez decidida la tecnología llamada a liderar la revolución de **IoT**. En la segunda parte del trabajo se ha procedido a un análisis detallado de los componentes que hacen del estándar IEEE 802.15.4 uno de los más firmes candidatos a llenar el hueco de crecimiento de **IoT** de aquí al año 2020.

En esta segunda parte se ha analizado la capa física del modelo OSI, y se ha realizado un repaso a los nuevos protocolos introducidos en el estándar para dotar de mejoras y nuevas funcionalidades al estándar, centrándose el estudio en los protocolos **CSL**, **RIT**, **TSCH**, siendo de especial importancia este último, al ser compatible con hardware anterior y poder ofrecer una robustez ampliada con un muy bajo consumo.

Analizada la capa física le tocó el turno a la capa de red donde se han localizado los protocolos **6LowPAN**, **RPL** y **6TiSCH**. Estos protocolos tienen especial importancia ya que permiten dotar a **IoT** de compatibilidad con IPv6 a nivel de cabeceras, enrutado y compatibilidad entre ellos y **TSCH**.

En el siguiente nivel se encuentra la capa de aplicaciones en la cual se han analizado **MQTT** y **CoAP**, dos protocolos diseñados para dotar de capacidad de interacción entre los dispositivos limitados en cuanto a procesamiento y aquellos dotados de **HTTP**.

Todos los protocolos anteriores se unen al modo de una cebolla dando lugar a una suite de protocolos realmente sólida con una gran proyección de futuro, ya que está totalmente adaptada a las premisas de **IoT**.

En la siguiente sección del trabajo se realiza un breve repaso a algunas plataformas de Hardware disponibles en el mercado, tanto de dispositivos con fines de investigación como de aquellos con madurez suficiente como para ser utilizados en entornos de producción.

Una de las plataformas que más se puede destacar por su completa adaptación a los nuevos protocolos descritos, así como de un grado de madurez tecnológica en cuanto a la construcción que permite su implantación en entornos productivos es la plataforma **OpenMote** de la compañía con su mismo nombre, o por nombrar otras que no están recogidas en el trabajo la plataforma *SmartMesh Ip* de **Linear Technology**. Hay que tener en cuenta que se han recogido algunas muestras

de hardware pretendiendo dar una idea general de las plataformas, sin entrar a analizar demasiado en detalle todas las soluciones tecnológicas existentes por quedar eso fuera del ámbito del presente documento.

Por último se ha realizado un breve repaso al software disponible para unir las plataformas analizadas con internet. Dentro de esta categoría tal vez el exponente con más capacidad de crecimiento y tecnológicamente más avanzado sea **OpenWSN** ya que cuenta con la pila completa de protocolos analizados en el presente trabajo y está totalmente basada en estándares abiertos, lo cual facilita su desarrollo en el futuro cercano.

Como trabajo pendiente a realizar cabe destacar un análisis completo similar al realizado con el protocolo IEEE 802.14.5 de las tecnologías **Bluetooth Low Power** y **WiFi**. De esta manera sería posible crear un marco completo de referencia sobre las tecnologías mejor posicionadas para cubrir las necesidades de futuro de **IoT** y sobre todo, se podrían enlazar diversas tecnologías para proponer soluciones a diversos escenarios.

# ANEXO

**Tabla de Ilustraciones.**

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1: Mapa de ámbitos de aplicaciones de IoT.....                                                   | 7  |
| Ilustración 2: Sensor inteligente de monitorización de polución acuática .....                               | 8  |
| Ilustración 3: Dispositivo localizador IoT .....                                                             | 8  |
| Ilustración 4 Sistema SmartPile antes de fraguar el cemento. ....                                            | 9  |
| Ilustración 5 Sistema de guía de aparcamiento.....                                                           | 10 |
| Ilustración 6: Red de detección de corriente eléctrica SenseNET Raptor.....                                  | 10 |
| Ilustración 7 Ciclo de funcionamiento del Proyecto HarvestGeek.....                                          | 11 |
| Ilustración 8: Píldoras inteligentes.....                                                                    | 12 |
| Ilustración 9: Mimo Smart Baby. ....                                                                         | 12 |
| Ilustración 10: Clasificación de IoT en base al rango de cobertura de los dispositivos.                      | 13 |
| Ilustración 11: Detalle de tecnologías según rango de comunicación WAN,MAN y LAN/PAN. ....                   | 14 |
| Ilustración 12: LTE capacidades .....                                                                        | 16 |
| Ilustración 13: Comparativa de propagación entre frecuencias de operación.....                               | 18 |
| Ilustración 14: Comparación velocidad y movilidad de tecnologías inalámbricas. ....                          | 19 |
| Ilustración 15: Esquema de características de tecnología DASH7 .....                                         | 20 |
| Ilustración 16: Conversor cinético EnOcean .....                                                             | 21 |
| Ilustración 17: Conversor lumínico de interior EnOcean.....                                                  | 21 |
| Ilustración 18: Conversor térmico EnOcean.....                                                               | 22 |
| Ilustración 19: ZigBee, importancia en IoT. ....                                                             | 27 |
| Ilustración 20: Comparativa entre Bluetooth Classic y Smart. ....                                            | 28 |
| Ilustración 21: Diferencias módulos Bluetooth.....                                                           | 28 |
| Ilustración 22: Crecimiento del mercado de dispositivos para IoT.....                                        | 31 |
| Ilustración 23: Silos de crecimiento de aplicaciones en IoT.....                                             | 32 |
| Ilustración 24: Dispositivos conectados y desconectados en IoT actualmente. ....                             | 32 |
| Ilustración 25: Distancia Vs Tamaño de Mercado, potencial de crecimiento en IoT. ....                        | 33 |
| Ilustración 26: Comparativa de tecnologías IoT en cuanto a rango, consumo y velocidad de transferencia ..... | 34 |
| Ilustración 27 Comparativa consumo /coste / velocidad de transmisión de tecnologías .....                    | 35 |
| Ilustración 28: Crecimiento estimado IoT por ingresos futuros .....                                          | 36 |
| Ilustración 29 Modelo en capas de las redes de sensores inalámbricas .....                                   | 37 |
| Ilustración 30 WSN Capa Física .....                                                                         | 38 |
| Ilustración 31 WSN capa MAC.....                                                                             | 38 |
| Ilustración 32: CSL operaciones básicas .....                                                                | 39 |
| Ilustración 33 RIT, Operación básica .....                                                                   | 41 |
| Ilustración 34 RIT: Operación con horario transmitido durante la solicitud de transmisión de datos.....      | 41 |
| Ilustración 35 Secuencia de mensajes para el procedimiento de encontrar un dispositivo en TSCH .....         | 42 |
| Ilustración 36: Capa de red.....                                                                             | 43 |
| Ilustración 37 6LoWPAN Header Stack .....                                                                    | 44 |
| Ilustración 38 IPv6 Header compression.....                                                                  | 45 |
| Ilustración 39 6LoWPAN Fragmentation header .....                                                            | 45 |

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 40 6LoWPAN Mesh Address Header .....            | 46 |
| Ilustración 41 RPL Instancias DAG .....                     | 47 |
| Ilustración 42 MQTT architecture example.....               | 49 |
| Ilustración 43 TelosB plataforma.....                       | 52 |
| Ilustración 44: Esquema físico TelosB .....                 | 52 |
| Ilustración 45 Plataforma de iniciación Z de Zolertia ..... | 53 |
| Ilustración 46: Capa de Aplicación .....                    | 56 |
| Ilustración 47: Tabla Hardware compatible Contiki .....     | 58 |
| Ilustración 48: OpenWSN Hardware support .....              | 60 |
| Ilustración 49: Comparativa de SO según RIoT .....          | 61 |

## Bibliografía

- Adaptive Network Solutions. (2014). *Adaptive Network Solutions Technology*. Retrieved from [http://www.an-solutions.de/wsn\\_technology.html](http://www.an-solutions.de/wsn_technology.html)
- ANT+. (2014). *ANT / ANT+ Defined*. Retrieved from <http://www.thisisant.com/developer/ant-plus/ant-antplus-defined/>
- Athow, D. (2014, 6 20). *TechRadar.pro : How Bluetooth Smart is shaping the internet of things*. Retrieved from <http://www.techradar.com/news/world-of-tech/future-tech/how-bluetooth-smart-is-shaping-the-internet-of-things-1253196/1#articleContent>
- Awesense Inc. (n.d.). *True Grid Intelligence™ (TGI)*. Retrieved from <http://www.awesense.com/solutions.html#tgi>
- Bigbelly Inc. (n.d.). *BigBelly Change your Space*. Retrieved from <http://bigbelly.com/solutions/stations/smartbelly/>
- Bradley, J. (2013). *Cisco: Embracing the Internet of Everything* . Retrieved from To Capture Your Share of \$14.4 Trillion: [http://www.cisco.com/web/about/ac79/docs/innov/loE\\_Economy.pdf](http://www.cisco.com/web/about/ac79/docs/innov/loE_Economy.pdf)
- British Geological Survey. (2010). *Assessment of Landslides using Acoustic Real-time Monitoring Systems (ALARMS)*. Retrieved from <http://www.bgs.ac.uk/research/tomography/alarms.html>
- Contiki. (2014). *Get Started With Contiki*. Retrieved from <http://www.contiki-os.org/start.html>
- Dash7 Alliance. (2014, 10). *DASH7 Alliance, Why Dash7 ?* Retrieved from [http://www.dash7-alliance.org/?page\\_id=18](http://www.dash7-alliance.org/?page_id=18)
- enGauge Inc. (2014). *Fire Extinguisher Monitoring Makes Sense*. Retrieved from <http://www.engageinc.net/fire-extinguisher-monitoring>
- EnOcean. (2014). *EnOcean Green Smart Wireless, Technology*. Retrieved from <https://www.enocean.com/en/technology/>
- Ericsson. (2010, 4 13). *CEO to shareholders: 50 billion connections 2020*. Retrieved from <http://www.ericsson.com/thecompany/press/releases/2010/04/1403231>
- Groendeldt, T. (2012, 8 3). *E-Commerce Style Big Data Analytics Meet Brick And Mortar Retailers*. Retrieved from Revista Forbes: <http://www.forbes.com/sites/tomgroendeldt/2012/08/03/e-commerce-style-big-data-analytics-meet-brick-and-mortar-retailers/>
- Ground Lab. (2014). *Open Source Lion Tracking Collars*. Retrieved from <http://home.groundlab.cc/lioncollars.html>

- IERC. (2009). *European Research Clustes on the Internet of Things*. Retrieved from [http://www.internet-of-things-research.eu/pdf/IoT\\_Cluster\\_Strategic\\_Research\\_Agenda\\_2011.pdf](http://www.internet-of-things-research.eu/pdf/IoT_Cluster_Strategic_Research_Agenda_2011.pdf)
- Isam Ishaq, D. C. (2013). ETF Standardization in the Field of the Internet of Things (IoT): A Survey. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 236-287.
- Jaffey, T. (2014, 2). *Eclipse*. Retrieved from MQTT and CoAP, IoT Protocols: [http://eclipse.org/community/eclipse\\_newsletter/2014/february/article2.php](http://eclipse.org/community/eclipse_newsletter/2014/february/article2.php)
- Libelium Corporation. (2014). *Smart Water Sensors to monitor water quality in rivers, lakes and the sea*. Retrieved from <http://www.libelium.com/smart-water-sensors-monitor-water-quality-leakages-wastes-in-rivers-lakes-sea#!prettyPhoto>
- Libelium Waspote. (n.d.). *Waspote Features*. Retrieved from <http://www.libelium.com/products/waspote>
- Mimo. (n.d.). *Mimo: Stay connected with the Mimo Baby Monitor*. Retrieved from <http://mimobaby.com/#MeetMimo>
- Nash, J. B. (1934). *The Internet of Things is coming – Jay B. Nash*. Retrieved from FLYCZ wordpress: <http://flyczba.wordpress.com/2014/04/13/the-internet-of-things-is-coming-jay-b-nash-1932/>
- Nest Inc. (2014). *Nest Learning Thermostat*. Retrieved from <https://nest.com/>
- NinjaBlocks. (2014). *Ninja Blocks Monitor and control your things anywhere*. Retrieved from <http://shop.ninjablocks.com/collections/ninja-blocks/products/ninja-blocks-kit>
- Olivier Hersent, D. B. (2011). *The Internet of Things: Key Applications and Protocols*. John Wiley & Sons.
- OpenWSN . (2014). *OpenWSN Home*. Retrieved from <https://openwsn.atlassian.net/wiki/display/OW/Hardware>
- Paulantonio, J. A. (2012, 07 22). *The Internet of things can Change*. Retrieved from <http://press.teleinteractive.net/tialife/2012/07/22/the-internet-of-things-and-change>
- Phidgets. (2014). *Phidgets products for USB sensing and Control*. Retrieved from <http://www.phidgets.com/products.php?category=1>
- Postscapes. (2013). *PostScapes Tracking the Internet of Things*. Retrieved from <http://postscapes.com/internet-of-things-history>
- Press, G. (2010, 6 18). *A Very Short History Of The Internet Of Things*. Retrieved from Forbes magazine: <http://www.forbes.com/sites/gilpress/2014/06/18/a-very-short-history-of-the-internet-of-things/>

- Proteus Digital Health. (n.d.). *Proteus Digital Health Announces FDA Clearance of Ingestible Sensor*. Retrieved from <http://proteusdigitalhealth.com/proteus-digital-health-announces-fda-clearance-of-ingestible-sensor/>
- Riot. (2014). *RiOT Features*. Retrieved from <http://riot-os.org/#features>
- Rohde&Schwarz. (2012, 6). *UMTS Long Term Evolution (LTE) - Technology Introduction*. Retrieved from [http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_application/application\\_notes/1ma111/1MA111\\_4E\\_LTE\\_technology\\_introduction.pdf](http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma111/1MA111_4E_LTE_technology_introduction.pdf)
- Sargent, N. (n.d.). *Bumblebee nesting project*. Retrieved from <http://niksargent.com/bumblebee/>
- Serbulent Tozlu, M. S. (2012, 6). *IEEE Communications*. Retrieved from Wi-Fi Enabled Sensors for Internet of Things: A Practical Approach: <http://web.univ-pau.fr/~cpham/ENSEIGNEMENT/PAU-UPPA/RHD/PAPER/OLD/WifiSensor.pdf>
- Smart Structures Inc. (2014). *Smart Structures EDC - Embedded Data Collector*. Retrieved from <http://smart-structures-inc.us/technology/EDC-embedded-data-collector/>
- Streetline Inc. (2014). *Introducing ParkSight™ 2.0 Parking Analytics*. Retrieved from <http://www.streetline.com/parking-analytics/>
- Tesla, N. (1926, Enero 30). *An interview with Nikola Tesla by John B. Kennedy*. Retrieved from Twenty Century Books: <http://www.tfcbooks.com/tesla/1926-01-30.htm>
- Thubert, P. (2013). *Industrial Ethernet Book*. Retrieved from <http://www.iebmedia.com/index.php?id=10339&parentid=63&themeid=255&hft=83&showdetail=true&bb=1>
- WeigthLess TM. (2014). *SPECTRUM FOR WEIGHTLESS*. Retrieved from <http://www.weightless.org/about/spectrum-for-weightless>
- WiMAX Forum. (2012). *WiMAX Forum Withe papers*. Retrieved from <http://resources.wimaxforum.org/resources/documents/marketing/whitepapers>
- ZigBee Alliance. (2012). *ZigBee Specifications*. Retrieved from <http://www.zigbee.org/Specifications.aspx>
- Z-Wave. (n.d.). *About Z-Wave, What is Z-Wave home control?* Retrieved from [http://www.z-wave.com/what\\_is\\_z-wave](http://www.z-wave.com/what_is_z-wave)



