# AGRADECIMIENTOS

En mi primer lugar, me gustaría agradecer a mis tutores de proyecto Jorge Portilla y Gabriel Mujica. Agradecer su colaboración y su experiencia en redes de sensores inalámbricas.

Dar las gracias también a mi familia por su constante apoyo y ánimo en épocas difíciles.

# RESUMEN

El mundo tiende a compartir cada vez más información, a estar cada vez más interconectado. Cada vez existe un mayor número de dispositivos conectados entre ellos y con Internet de múltiples maneras. De todo esto surge lo que se conoce, en inglés, como **Internet of Things** o **IoT**, o en español, Internet de las cosas.

Este concepto consiste en redes de sensores capaces de monitorizar su entorno, reaccionando ante posibles cambios.

# INDICE

[AGRADECIMIENTOS 3](#_Toc60937320)

[RESUMEN 4](#_Toc60937321)

[INDICE 5](#_Toc60937322)

[ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS 7](#_Toc60937323)

[ILUSTRACIONES 9](#_Toc60937324)

[ECUACIONES 10](#_Toc60937325)

[TABLAS 11](#_Toc60937326)

[CÓDIGOS 12](#_Toc60937327)

[1. INTRODUCCIÓN 13](#_Toc60937328)

[2. ESTADO DEL ARTE 14](#_Toc60937329)

[2.1. Internet of Things (IoT) 14](#_Toc60937330)

[2.1.1. Introducción [2] 14](#_Toc60937331)

[2.1.2. Componentes [2] 15](#_Toc60937332)

[2.1.2.1. Dispositivo 15](#_Toc60937333)

[2.1.2.2. Red Local 16](#_Toc60937334)

[2.1.2.3. Internet 16](#_Toc60937335)

[2.1.2.4. Servicios Backend 16](#_Toc60937336)

[2.1.2.5. Aplicaciones 17](#_Toc60937337)

[2.1.3. Sensores 17](#_Toc60937338)

[2.1.4. Arquitectura [3] 18](#_Toc60937339)

[2.1.4.1. Capa de Sensorizado 18](#_Toc60937340)

[2.1.4.2. Capa de Red 18](#_Toc60937341)

[2.1.4.3. Capa de Servicio 19](#_Toc60937342)

[2.1.4.4. Capa de Interfaz 19](#_Toc60937343)

[2.2. 6LoWPAN [4] 20](#_Toc60937344)

[2.3.1. Significado 6LoWPAN [4] 20](#_Toc60937345)

[3. OBJETIVOS 21](#_Toc60937346)

[4. MÉTODOS Y EQUIPO 22](#_Toc60937347)

[5. EXPERIMENTOS 23](#_Toc60937348)

[6. RESULTADOS Y ANÁLISIS 24](#_Toc60937349)

[7. CONCLUSIONES 25](#_Toc60937350)

[8. LINEAS FUTURAS 26](#_Toc60937351)

[9. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO 27](#_Toc60937352)

[10. BIBLIOGRAFÍA 28](#_Toc60937353)

# ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

|  |  |
| --- | --- |
| IoT | Internet of Things |
| LTE | Long Term Evolution |
| eNB | eNodeB |
| EPS | Evolved Packet System |
| EPC | Evolved Packet Core |
| NAS | Non Access Stratum |
| LPWAN | Low Power – Wide Area Networks |
| CNAF | Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias |
| LTE-M | LTE Cat-M1 |
| 3GPP | 3er Generation Partnership Project |
| GSM | Global System for Mobile |
| GPRS | General Packet Radio Service |
| HD-FDD | Half Duplex – Frequency Division Duplexing |
| eDRX | Extended Discontinuous Reception |
| UE | User Equipment |
| PSM | Power Saving Modes |
| QPSK | Quadrature Phase Shift Keying |
| BPSK | Binary Phase Shift Keying |
| RRC | Radio Resource Control |
| MCL | Maximun Coupling Lost |
| DONAS | Data Over Non-Access Stratum |
| OFDMA | Orthogonal Frequency-Division Multiple Access |
| TX | Transmission |
| RX | Reception |
| SFN | System Frame Number |
| SC-FDMA | Sigle-Carrier Frequency Division Multiple Access |
| NPDCCH | Narrowband Physical Downlink Control Channel |
| NPDSCH | Narrowband Physical Downlink Shared Channel |
| NPBCH | Narrowband Physical Broadcast Channel |
| NRS | Narrowband Reference Signal |
| NPSS | Narrowband Primary Synchronization Signal |
| NSSS | Narrowband Secondary Synchronization Signal |
| NPRACH | Narrowband Physical Random-Access Channel |
| NPUSCH | Narrowband Physical Unlink Shared Channel |
| MIB-NB | Narrowband Master Information Block |
| CRC | Cyclic Redundancy Check |
| TBCC | Tail Biting Convolutional Coder |
| DCI | Download Control Information |
| RAR | Random Access Response |
| RAP | Random Access Process |
| SIB-NB | Narrowband System Information Block |
| HARQ | Hybrid automatic repeat request |
| TB | Transport / transmission Block |
| RE | Resource Element |
| SNR | Signal-to-Noise Ratio |
| CP | Cyclic Prefix |
| TOA | Time of Arrival |
| PAPR | Peak-to-Average Power Ratio |
| DMRS | Demodulation Reference Signal |

# ILUSTRACIONES

[Ilustración 1 Principales tecnologías de redes LPWAN. (fuente: http://micm.es/noticias/iot-el-internet-de-las-cosas/) 19](#_Toc41292283)

[Ilustración 2 Modos De Operación NB-IoT (1) [8] [9] 21](#_Toc41292284)

[Ilustración 3 Modos de Operación NB-IoT (2) [10] [9] 22](#_Toc41292285)

[Ilustración 4 Arquitectura básica NB-IoT [6] 23](#_Toc41292286)

[Ilustración 5 Ilustración 5 Optimizaciones sobre EPS específicas. Pila de protocolo de NB-IoT específica para planos de Control y de Usuario [10] 24](#_Toc41292287)

[Ilustración 6 Esquema del Frame de NB-IoT [6] 26](#_Toc41292288)

[Ilustración 7 Grid de Recursos. Espaciado 15 kHz (drcha) y 3.75 kHz (izda) [9][12] 27](#_Toc41292289)

[Ilustración 8 NPSS & NSSS Transmisión [16] 28](#_Toc41292290)

[Ilustración 9 Mapeado de NPBCH a los subframes o subtramas [17] 29](#_Toc41292291)

[Ilustración 10 Multiplexación en tiempo de los canales físicos y señales del enlace de Bajada [13] 31](#_Toc41292292)

[Ilustración 11 Preámbulo NPRACH [9] 31](#_Toc41292293)

[Ilustración 12 Salto de Frecuencias en el canal NPRACH [13] 32](#_Toc41292294)

# ECUACIONES

# TABLAS

[Tabla 1 Comparación de tecnologías LPWAN [5] 16](#_Toc40687194)

[Tabla 2 Resumen de Canales y Señales Físicos de NB-IoT [12], [14] 24](#_Toc40687195)

# CÓDIGOS

# INTRODUCCIÓN

# ESTADO DEL ARTE

En los últimos años, se han ido desarrollando cada vez más las tecnologías para Internet of Things, IoT. Entre estas tecnologías están las tecnologías de comunicaciones inalámbricas tanto a redes de áreas pequeñas como de áreas extensas. Estas últimas, conocidas como WAN (wide área network), son usadas como base para la gran mayoría de arquitecturas en proyectos IoT.

En este estudio nos centraremos en las características de una de ellas: Narrowband IoT (NB-IoT). Para esto conviene conocer mínimamente las tecnologías IoT, y en concreto, el modelo de la tipología red WAN sobre la que mejor se aplica IoT en casos de conexiones inalámbricas: LPWAN.

## Internet of Things (IoT)

En el IoT, un gran número de tecnologías inalámbricas, como el WiFi, el Bluetooth, LoRa, NB-IoT, 2G/3G/4G, etc., han sido usadas en diversas aplicaciones, conectando entre si a millones de dispositivos de manera inalámbrica. 3G y 4G son muy usados en IoT, pero no están totalmente optimizados para aplicaciones de este tipo. A pesar de esto, el 4G ha mejorado bastante algunas de las capacidades de las redes móviles, dando a los dispositivos IoT acceso a Internet. Dentro de la conectividad 4G hay varios tipos de tecnologías como BLE, WiMaxb, LTE, Zigbee, LoRa, NB-IoT, etc. [1]

### Introducción [2]

Mientras que IoT ofrece muy buenas oportunidades, sigue siendo un reto pendiente el manejo de todo lo que lleva integración continua del mundo físico. Actualmente hay dos APIs para las comunicaciones IoT:

* REST basado en API.
* WebSocket basado en API.

IoT es un término paraguas, que acoge a muchas tecnologías dentro de sí. Las siguientes tecnologías son ejemplos de las que dan paso al desarrollo de IoT:

* WSN.
* Cloud Computing.
* Big Data Analytics.
* Sistemas Embebidos
* Arquitectura y Protocolos de Seguridad
* Protocolos de Comunicación
* Servicios Web.
* Internet Móvil
* Motor de búsqueda semántico.

Dentro de todas estas tecnologías, las WSN son el corazón de IoT. Dentro de la tecnología IoT hay tres principales objetivos:

* Dar un puente entre la parte rica y la parte pobre.
* Distribuir los recursos del mundo a los necesitados.
* Ser más proactivo y menos reactivo.

También existe otra tecnología M2M, cuya comunicación se basa en redes de dispositivos intercambiando o enviando datos sin interacción humana. Las diferencias entre M2M e IoT las indicamos en esta tabla.

|  |  |
| --- | --- |
| **M2M** | **IoT** |
| Centrada en la capa por debajo de la capa de red. | Centrado en la capa por encima de la capa de red. |
| Sensado y actuación pueden no estar involucrados. | Sensado y actuación pueden estar involucrados. |
| Énfasis en hardware. | Énfasis en software. |
| La nube no está involucrada. | La nube esta involucrada. |

Tabla Diferencias M2M – IoT [2]

A nivel de hardware hay ciertos requisitos hardware que llevan tanto al desarrollo de una infraestructura IoT como en el de redes de comunicación:

1. Fuente de alimentación y Manejo de la alimentación.
2. Sensores o Actuadores.
3. Procesador y Espacio de memoria.
4. Comunicaciones Inalámbricas.
5. UI/UX.

### Componentes [2]

Los principales componentes funcionales de las tecnologías IoT son:

* Componente para la interacción y comunicación con otros IoT.
* Componente para operaciones de procesado y análisis de los datos.
* Componente para la interacción con internet.
* Componente para el manejo de servicios Web de la aplicación.
* Componentes para la integración de los servicios de la aplicación.
* Interfaz de usuario para acceder al IoT.

#### Dispositivo

Los dispositivos IoT tienen identidades únicas. Es un dispositivo físico que está embebido con sensores, actuadores, electrónica, software, una red de conectividad con otros objetos con los que intercambiar datos. Se realizan tareas como sensorizado, actuación y monitorización de manera remota. Hay mucha variedad de dispositivos, pero todos se pueden reducir a dos tipos: dispositivos estándar o dispositivos restringido. Los datos son intercambiados con otros dispositivos y aplicaciones, incluso enviando esos datos a servidores centralizados o aplicaciones basadas en procesamiento de datos en la nube.

Los dispositivos restringidos son pequeños, al igual que sus capacidades de cómputo, memoria y otras características. Estos pequeños dispositivos restringidos necesitan de un dispositivo que haga de Gateaway para poder conectarse a la plataforma de la nube.

Los dispositivos estándar son similares a pequeños ordenadores y dirigen los datos directamente a la nube de la red sin necesidad de un Gateaway.

#### Red Local

Como se ha comentado anteriormente, IoT es una red de dispositivos interconectados y se generarán una gran cantidad de datos. Estas redes son usadas para transmitir las señales que se recogerán posteriormente en los sensores con el resto de diferentes componentes, como los routers, puentes, LAN, WAN y MAN. Esta conectividad de las redes para los sensores se puede utilizar cualquiera de las tecnologías disponibles como el Wi-Fi, LTE, etc. Para la generación de esta red se deben seguir las siguientes bases:

* Alta tasa de datos.
* Bajos precios en uso de datos.
* Despliegue IPV6

#### Internet

El Internet es el sistema de redes de ordenadores interconectados globalmente usando el protocolo de internet para unir los diferentes dispositivos. Internet da la posibilidad de nuevos servicios, acelerando y permitiendo nuevas zonas de interacción con mensajes instantáneos y social networking, entre otros.

#### Servicios Backend

Los servicios principales que se ofrecen son:

* Monitorización de dispositivos.
* Servicios de control de dispositivos.
* Servicios de publicación de datos.
* Servicios de búsqueda de datos.

Estos Servicios Backend se definen como un conjunto de servicios basados en la nube que ayudan a construir la aplicación IoT o aplicación Backend. Tienen un rápido almacenamiento de datos y una fácil gestión de usuarios. Para toda estrategia de una empresa IoT es una solución bonita. La parte delantera de una solución IoT asegura al usuario final un aumento de seguridad o añadirá valor en sus vidas.

Una vez se recolectan los datos con el producto, se envían a la nube, donde se guardarán en servidores que permitirán al usuario computarlos.

#### Aplicaciones

Las principales aplicaciones para IoT son:

* Smart Home
* Accesorios
* Coches conectados
* Smart Cities
* IoT en la Agricultura

### Sensores

Los sensores son el componente más importante en IoT. Es el dispositivo que se opera con baja potencia, menos energía y recursos limitados de almacenamiento. Hay dos tipos de clases de sensores, según nos fijemos en **el tipo de** **salida** o el **tipo de dato.**

Según el **tipo de salida** tenemos las siguientes clases de sensores:

1. **Sensores Analógicos:** Estos sensores generan una señal continua de salida. Sensores de este tipo son como los acelerómetros, sensor de presión, de sonido, de temperatura, etc. Sensores que captan cantidades analógicas y que son continuas en la naturaleza.
2. **Sensores Digitales:** Son usados para medidas analíticas generalmente. Producen una salida binaria, un “1” lógico o un “0” lógico, son valores discretos que pueden ser un solo “bit” (transmisión serie) o un conjunto de bits formando un único “byte” de salida (transmisión paralela).

Por otro lado, según el **tipo de dato** tenemos las siguientes clases de sensores:

1. **Sensores escalares:** La señal de salida generada por el sensor, o el voltaje, es proporcional a la magnitud que se está midiendo. Mediciones físicas como temperatura, presión, etc., son magnitudes escalares cuyo valor es suficiente información. Dichas mediciones también variarán respondiendo proporcionalmente a los cambios en la medida realizada.
2. **Sensores vectoriales:** Se produce una señal de salida, o voltaje, proporcionales tanto a la magnitud medida como la orientación de lo que se mide. Ejemplos de esto pueden ser imágenes, sonido, velocidad, aceleración, orientación, etc., medidas de las cuales solo el valor o magnitud no da una información completa. Por ejemplo, un cuerpo con una aceleración, puede tener una aceleración en sus tres ejes, por lo que una información completa sería la aceleración de los 3 ejes, no solo la magnitud del vector resultante de los 3 ejes.

### Arquitectura [3]

La arquitectura de las tecnologías IoT es una arquitectura orientada al servicio (SOA por sus siglas en inglés). A continuación, se explicará una arquitectura SOA de cuatro capas, la cuál se ha pensado desde el punto de vista de las funcionalidades.

Este diseño se compone de las capas de Sensorizado, Red, Servicio e Interfaz.

#### Capa de Sensorizado

IoT puede considerarse una red física globalmente interconectada, en la cual, las cosas pueden ser conectadas o ser controladas remotamente. Cada vez más dispositivos cuentan con equipamiento de RFID o sensores inteligentes, por lo que la conectividad cada vez es más sencilla. En esta capa, los sistemas inalámbricos inteligentes con sensores, toman las medidas e intercambian la información con diferentes dispositivos. Esto ayuda a identificar cambios en el ambiente.

#### Capa de Red

La función de esta capa es la de conectar todo entre sí y permitir el envío de información entre dispositivos. Además, es capaz de añadir información sobre las infraestructuras IT existentes. En la arquitectura SOA de IoT, los servicios, aportados por los dispositivos, son desplegados en redes heterogéneas y los dispositivos relacionados se introducen en el servicio de Internet.

Este proceso puede involucrar el manejo y control de QoS (Quality of Service) para así cumplir con los requerimientos de los usuarios y/o aplicaciones. Por otro lado, es importante que se automatice el encontrar y mapear los dispositivos o “cosas” para una dinámica red cambiante. Estos dispositivos necesitan que se les asigne un rol automáticamente, para desplegar, manejar y organizar (scheduling) comportamientos de los dispositivos y ser capaces de cambiar de rol en cualquier momento según necesite. Esto habilita a los dispositivos para colaborar en la realización de las distintas tareas. Para diseñar esta capa, los diseñadores necesitan:

* Tecnologías de gestión de redes para redes heterogéneas.
* Eficiencia energética.
* Requerimientos QoS.
* Procesamiento de datos y señales.
* Seguridad.
* Privacidad.

#### Capa de Servicio

Esta capa se apoya en la tecnología del Middleware que aporta funcionalidades para integrar de manera correcta servicios y aplicaciones en IoT. La tecnología Middleware provee a IoT con una plataforma coste-eficiencia, donde pueden ser reusadas las plataformas Hardware and Software. La principal actividad de esta capa implica las especificaciones de servicio para middleware. Una capa de servicio bien diseñada será capaz de identificar los requerimientos comunes de aplicación y dar APIs y protocolos para soportar los servicios, aplicaciones y necesidades de usuario requeridas. Además, se procesan todos los problemas orientados al servicio, incluyendo el intercambio y almacenamiento de información, gestión de datos, comunicación y motor de búsqueda. Los componentes de esta capa son:

* Descubrimiento de Servicio: Encontrar objetos que puedan aportar los servicios requeridos y la información deseada de manera eficiente.
* Composición de Servicio: Habilita la interacción entre los dispositivos conectados. Esta fase es para hacer el scheduling, u organización, o recrear servicios más ajustados de cara a conseguir la manera más fiable de lograr los requerimientos.
* Gestión de la confianza: Buscando un mecanismo de confianza que pueda evaluar y usar la información aportada por los otros servicios para crear un sistema de confianza.
* Servicio APIs: Apoyando la interacción entre los servicios requeridos en IoT.

#### Capa de Interfaz

En IoT hay muchos dispositivos involucrados, los cuáles son de diferentes proveedores y no siempre usan los mismos estándares o protocolos, por lo que suele haber problemas en las comunicaciones e intercambios de información entre los dispositivos. Cómo el número de dispositivos sigue creciendo, este problema se incrementa y se hace más dificultoso. Va apareciendo la necesidad de una capa de Interfaz que simplifique la gestión y la interconexión de los distintos dispositivos. Un perfil de interfaz (InterFace Profile, IFP) puede ser visto con un subconjunto de los estándares de servicios que ayudan a la interacción con aplicaciones dentro de la red. Los perfiles de interfaz son usados para describir las especificaciones entre las aplicaciones y los servicios. Los servicios, en su respectiva capa, corren en una limitada red de infraestructuras para encontrar eficientemente nuevos servicios para una aplicación y conectarlos a la red.

Tradicionalmente, la capa de servicio daba una API universal a las aplicaciones. Sin embargo, con los nuevos resultados de investigaciones sobre SOA-IoT, se ha visto que el Proceso de provisionamiento de servicios (SPP de sus siglas en inglés) puede también dar una interacción efectiva entre aplicaciones y servicios. El SPP empieza haciendo una “consulta de tipos” que envía una petición a los servicios con un formato WSDL genérico y usan un mecanismo de búsqueda para encontrar servicios potenciales. Basados en el contexto de aplicación y la información QoS, todas las instancias de servicios se clasifican y un mecanismo de provisionamiento según demanda se usará para identificar los servicios que encajen con los requerimientos de la aplicación. Finalmente se evalúa el proceso.

## 6LoWPAN [4]

Muchas de las soluciones patentadas, como ZigBee, están vinculadas verticalmente o perpendicularmente a una capa de enlace y los perfiles de aplicación solamente resuelven una pequeña parte de las múltiples aplicaciones para redes inalámbricas integradas. Estas también se encuentran con problemas a la hora de evolucionarlas, integración a Internet y de escalabilidad.

**6LoWPAN** consigue vencer estos problemas gracias al uso de IPV6, en dispositivos integrados de bajo consumo y procesamiento limitado, sobre redes inalámbricas de bajo ancho de banda.

### 2.3.1. Significado 6LoWPAN [4]

6LoWPAN es la abreviación de **IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks**

Vayamos ahora a desglosar por partes:

1. **6 en 6LoWPAN**

El **6** se debe a que este sistema está basado en IPv6. IPv6 es el nuevo Protocolo de Internet, y será el que termine reemplazando a IPv4, debido a que este se está llegando al límite de su rango de direcciones IP posibles.

Mientras que **IPv4** ofrece **232** direcciones (4,294,967,296 direcciones posibles IP en Internet), **IPv6** ofrece **2128** direcciones posibles (3.4x1038 direcciones).

1. **Lo en 6LoWPAN**

**Lo** se debe a Low Power o baja potencia. Usualmente las comunicaciones IP van contrarias a un bajo consumo de potencia. Pero se ha logrado gracias a los sensores inalámbricos y un gran desarrollo, llegar a reducir bastante el consumo.

1. **WPAN en 6LoWPAN**

**WPAN** corresponde a Wireless Personal Area Networks. Una WPAN es la red personal en área que conecta los dispositivos de una persona. Un ejemplo de este tipo de redes son las redes Bluetooth, usadas para conectar, por ejemplo, los smartphones con cascos o auriculares Bluetooth, o incluso con un sistema de manos libres.

En 6LoWPAN se pueden crear redes en mallas, incluyendo una mayor distancia. Debido al uso de 868/915 MHz en vez de 2400 MHz, la cobertura dentro de edificios es mucho mayor.

### 2.3.2. Pila de Protocolos de 6LoWPAN [4]–[6]

# OBJETIVOS

# MÉTODOS Y EQUIPO

# EXPERIMENTOS

# RESULTADOS Y ANÁLISIS

# CONCLUSIONES

# LINEAS FUTURAS

# PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO

# BIBLIOGRAFÍA

[1] S. Li, L. Da Xu, and S. Zhao, “5G Internet of Things: A survey,” *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 10, no. February, pp. 1–9, 2018.

[2] R. M. Gomathi, G. H. S. Krishna, E. Brumancia, and Y. M. Dhas, “A Survey on IoT Technologies, Evolution and Architecture,” *2nd Int. Conf. Comput. Commun. Signal Process. Spec. Focus Technol. Innov. Smart Environ. ICCCSP 2018*, no. Icccsp, pp. 1–5, 2018.

[3] L. Da Xu, W. He, and S. Li, “Internet of things in industries: A survey,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2233–2243, 2014.

[4] A. J. Albarakati, J. Qayyum, and K. a. Fakeeh, “A Survey on 6LowPAN & its Future Research Challenges,” *Int. J. Comput. Sci. Mob. Comput.*, vol. 3, no. 10, pp. 558–570, 2014.

[5] Y. Chen *et al.*, “6LoWPAN stacks: A survey,” *7th Int. Conf. Wirel. Commun. Netw. Mob. Comput. WiCOM 2011*, pp. 6–9, 2011.

[6] Z. Shelby and C. Bormann, *6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet*, no. c. 2009.