



Estudio en detalle y evaluación de protocolo BLE Mesh

Ricardo Gabriel Portillo Criado

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación UOC-URL
Telemática

Jose Lopez Vicario

Xavi Vilajosana Guillen

10-06-2018



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

Licencias alternativas (elegir alguna de las siguientes y sustituir la de la página anterior)

A) Creative Commons:



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/)



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/es/)



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/es/)



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-CompartirIgual [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/es/)



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/es/)

B) GNU Free Documentation License (GNU FDL)

Copyright © 2018 Ricardo Gabriel Portillo Criado.

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.3 or any later version published by the Free

Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts.

A copy of the license is included in the section entitled "GNU Free Documentation License".

C) Copyright

© (el autor/a)

Reservados todos los derechos. Está prohibido la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la impresión, la reprografía, el microfilme, el tratamiento informático o cualquier otro sistema, así como la distribución de ejemplares mediante alquiler y préstamo, sin la autorización escrita del autor o de los límites que autorice la Ley de Propiedad Intelectual.

FICHA DEL TRABAJO FINAL

| | |
|---|---|
| Título del trabajo: | <i>Estudio en detalle y evaluación de protocolo BLE Mesh</i> |
| Nombre del autor: | <i>Ricardo Gabriel Portillo Criado</i> |
| Nombre del consultor/a: | <i>Jose Lopez Vicario</i> |
| Nombre del PRA: | <i>Xavi Vilajosana Guillen</i> |
| Fecha de entrega (mm/aaaa): | 06/2018 |
| Titulación: | <i>Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación UOC-URL</i> |
| Área del Trabajo Final: | <i>Telemática</i> |
| Idioma del trabajo: | <i>Español</i> |
| Palabras clave | <i>Bluetooth Low Energy</i> |
| <p>Resumen del Trabajo (máximo 250 palabras): <i>Con la finalidad, contexto de aplicación, metodología, resultados i conclusiones del trabajo.</i></p> | |
| <p>El objetivo de este Trabajo Final de Máster es realizar un estudio exhaustivo y una evaluación del protocolo Bluetooth Low Energy (BLE) aplicado a redes mesh. Nos centraremos en este protocolo debido al continuo crecimiento de las redes IoT y su popularidad en los últimos años, así como, las continuas mejoras con Bluetooth Low Energy (BLE) combinadas con chips de bajo costo que han convertido a BLE en una tecnología líder en Internet de las cosas (IoT). BLE se encuentra actualmente disponible en miles de millones de teléfonos inteligentes, lo que hace que BLE impulse mercados como los sensores portátiles de salud y fitness en los que se requiere una baja potencia y una baja tasa de transmisión.</p> <p>Para abordar este estudio se partirá de diversos estudios previos realizados por terceros que han realizado simulaciones para evaluar el protocolo en distintos ámbitos. Además, se definirá el protocolo y su origen, se realizará una comparación de éste con otros protocolos inalámbricos que se utilizan en Internet de las Cosas (IoT) con el objetivo de resaltar las limitaciones del mismo y como afrontarlas.</p> | |

Abstract (in English, 250 words or less):

The aim of this Project is to carry out an exhaustive study and evaluation of the Bluetooth Low Energy (BLE) protocol applied to mesh networks. We will focus on this protocol due to the continuing growth of the IoT networks and their popularity in recent years, as well as the continuous improvements of Bluetooth Low Energy (BLE) combined with low cost chips that have made BLE a leading technology in Internet of things (IoT). BLE is currently available in billions of smartphones, which means that BLE promotes markets such as health and fitness sensors that require low power and a low transmission rate.

To approach this study, we will start from several previous studies carried out by third parties that have carried out simulations to evaluate BLE protocol in different areas. In addition, BLE protocol and its origin will be defined, it will be compared with other wireless protocols that are used in Internet of Things (IoT) in order to highlight the limitations of it and how to deal with them.

Índice

| | |
|---|-----------|
| Índice | iii |
| Lista de figuras | 5 |
| Lista de tablas..... | 1 |
| 1. Introducción..... | 2 |
| 1.1. Contexto y justificación del Trabajo..... | 2 |
| 1.2. Objetivos del Trabajo..... | 2 |
| 1.3. Enfoque y método seguido | 3 |
| 1.4. Planificación del Trabajo | 3 |
| 1.4.1. Recursos necesarios..... | 3 |
| 1.4.2. Planificación temporal | 4 |
| 1.5. Breve descripción de los otros capítulos de la memoria | 4 |
| 2. Estado del arte | 6 |
| 2.1. Bluetooth | 6 |
| 2.1.1 Bluetooth Low Energy (BLE) | 7 |
| 2.2. Zigbee..... | 7 |
| 2.3. Wi-Fi 802.11ah | 8 |
| 2.4. SigFox..... | 9 |
| 2.5. LoRAWAN | 10 |
| 2.6. 6LoWPAN | 10 |
| 2.7. Redes celulares | 11 |
| 2.8. Otras tecnologías/protocolos usados..... | 11 |
| 2.8.1. NFC..... | 12 |
| 2.8.2. Thread..... | 12 |
| 2.8.3. Z-Wave..... | 13 |
| 2.9. Tablas comparativas..... | 13 |
| 3. Bluetooth Low Energy Protocol | 16 |
| 3.1. Introducción a BLE..... | 16 |
| 3.1.1. Redes mesh..... | 17 |
| 3.2. BLE conceptos básicos | 19 |
| 3.2.1. BLE: Capa física | 19 |
| 3.2.2. BLE: Formato trama | 21 |
| 3.2.3. BLE: Pila de protocolos | 22 |
| 3.2.4. BLE: Modos de comunicación y tipos de nodos | 23 |
| 3.2.5. BLE: Capa de enlace..... | 25 |
| 4. Protocolos/Aplicaciones BLE a redes mesh | 28 |
| 4.1. Estándares BLE para redes mesh..... | 29 |
| 4.1.1. Bluetooth SIG: Bluetooth Smart Mesh | 29 |
| 4.1.2. IETF: IPv6 over BLE Mesh Networks | 29 |
| 4.2. Soluciones académicas de BLE para redes mesh | 30 |
| 4.2.1. Flooding-Based Solutions | 30 |
| 4.2.2. Routing-Based Solutions..... | 31 |
| 4.2.2.1. Soluciones basadas en encaminamiento estático..... | 31 |
| 4.2.2.2. Soluciones basadas en encaminamiento dinámico | 31 |
| 4.3. Soluciones patentadas BLE para redes mesh | 32 |
| 4.3.1 CSRmesh | 32 |

| | |
|---|-----------|
| 4.4. Resumen apartado | 32 |
| 5. Evaluación de BLE mesh | 35 |
| 5.1. Limitaciones de BLE mesh..... | 35 |
| 5.2. Previo a la evaluación: selección de caso de uso y métricas..... | 38 |
| 5.3. Evaluación de BLEmesh: entorno indoor..... | 39 |
| 5.3.1. Latencia frente a número de saltos..... | 40 |
| 5.3.2. Latencia frente a número de nodos | 42 |
| 5.3.3. Comportamiento frente a interferencias..... | 44 |
| 5.4. Evaluación de BLEmesh: comparativa otras tecnologías..... | 45 |
| 5.4.1. Latencia frente a número de saltos..... | 45 |
| 5.4.2. Latencia frente a número de nodos | 47 |
| 5.4.3. Velocidad de transmisión frente a número de saltos | 50 |
| 5.4.3. Conclusiones de la evaluación..... | 51 |
| 6. Conclusiones | 53 |
| 6.1. Conclusiones y líneas futuras..... | 53 |
| 6.2. Lecciones aprendidas | 54 |
| 6.3. Objetivos logrados y seguimiento de la planificación..... | 54 |
| 7. Glosario | 55 |
| 8. Bibliografía | 57 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Modos de conexión redes mesh: malla conexión completa, izquierda, y malla conexión parcial, derecha [17]..... | 17 |
| Figura 2 - Robustez redes mesh, ejemplo [17] | 18 |
| Figura 3 - BLE: Distribución de canales [3] | 20 |
| Figura 4 - BLE. Canales BLE y WiFi [18]..... | 20 |
| Figura 5 - BLE: Formato trama [19] | 21 |
| Figura 6 - BLE: Pila de protocolos [20]..... | 22 |
| Figura 7 - Eventos de conexión e intervalos de conexión en BLE [22]. | 25 |
| Figura 8 - BLE mecanismo de acceso al medio [16]..... | 26 |
| Figura 9 - Soluciones BLE a redes mesh [23] | 29 |
| Figura 10 – RT-BLE ejemplo de subredes [16] | 36 |
| Figura 11 - Latencia en función del número de saltos paquetes no fragmentados [28]..... | 40 |
| Figura 12 - Latencia en función del número de saltos con fragmentación [28]. | 41 |
| Figura 13 - Latencia en función del tamaño de la red (red pequeña) [28] | 42 |
| Figura 14 - Latencia en función del tamaño de la red (red grande) [28] | 43 |
| Figura 15 - Espectro de frecuencias de BLE, Bluetooth, Zigbee y WiFi [29]. ... | 44 |
| Figura 16 – Comparativa latencia en función del número de saltos[28] | 46 |
| Figura 17 - Comparativa latencia en función de la carga útil para 4 saltos[28] | 47 |
| Figura 18 - Latencia en función del tamaño de la red (red pequeña) [28] | 48 |
| Figura 19 – Comparativa latencia en función del tamaño de la red (red pequeña) [28]..... | 48 |
| Figura 20 - Comparativa latencia en función del tamaño de la red (red grande) [28]..... | 49 |
| Figura 21 - Comparativa velocidad de transmisión en función del número de saltos (pequeños paquetes) [28] | 50 |
| Figura 22 - Comparativa velocidad de transmisión en función del número de saltos (paquetes gran tamaño)[28]..... | 51 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1 - Tabla comparativa de las tecnologías IoT (I)..... | 14 |
| Tabla 2 - Tabla comparativa de las tecnologías IoT (II)..... | 15 |
| Tabla 3 - Soluciones basadas en difusión (<i>flooding-based solutions</i>)..... | 33 |
| Tabla 4 - Soluciones basadas en encaminamiento (<i>routing-based solutions</i>).. | 33 |
| Tabla 5 - Soluciones patentadas BLE para redes mesh..... | 34 |
| Tabla 6 - Latencia según tipo de aplicación [30]. | 39 |

1. Introducción

En este apartado se abordarán las principales motivaciones que han llevado al desarrollo de este proyecto. Para ello se presentará la motivación y justificación del trabajo, después los objetivos que se quieren alcanzar con el proyecto, definiendo el enfoque y método seguidos.

Una vez abarcados el objetivo y las motivaciones, se presentará la planificación temporal y los recursos necesarios para el proyecto, así como una breve descripción de la estructura de la memoria para alcanzar los objetivos presentados.

1.1. Contexto y justificación del Trabajo

Debido a la continua importancia actual de las comunicaciones inalámbricas, así como el continuo crecimiento y popularidad de Internet de las Cosas (IoT), se ha escogido realizar un estudio en detalle y realizar una evaluación del protocolo Bluetooth Low Energy (BLE).

Estas tecnologías inalámbricas aplicadas a IoT se caracterizan por transmitir poca información de forma fiable y flexible, consumir poca batería en los dispositivos y ofrecer una gran escalabilidad.

Se considera un tema en auge en la sociedad que nos encontramos debido a que cada vez aparecen más tecnologías inalámbricas para satisfacer la creciente demanda de IoT y a que la tendencia actual se enfoca en usar sistemas autónomos que trabajen por sí mismos y se encuentren todos interconectados entre sí. Además, estas tecnologías tienen importantes repercusiones económicas debido a su eficiencia y variedad de aplicaciones en las que pueden funcionar.

Tras este estudio, en el que se realizará una comparativa con las distintas tecnologías inalámbricas existentes en el ámbito de IoT, de las cuales se realizará una breve descripción. La finalidad de esta comparativa será saber en qué escenarios conviene aplicar el protocolo BLE y qué ventajas o limitaciones presenta en diversos entornos.

1.2. Objetivos del Trabajo

Los objetivos de este estudio de investigación se listarán a continuación:

- Realizar un estado del arte de las tecnologías actuales presentes en IoT.
- Definir en detalle el protocolo Bluetooth Low Energy (BLE) aplicado a redes mesh, entrando en detalle en sus cambios con respecto a la tecnología Bluetooth, así como sus usos y aplicaciones.

- Identificar casos de uso como tipo de aplicación, tipo de empresa o nivel de seguridad/flexibilidad, donde BLE mesh puede ser la mejor opción respecto a sus alternativas.
- Realizar una comparativa con otras tecnologías/protocolos de IoT, como Zigbee, Sigfox o 802.11ah, en términos de rendimiento, consumo de batería, escalabilidad o número máximo de nodos.

1.3. Enfoque y método seguido

Debido a que se trata de un proyecto de investigación sobre una tecnología ya existente, como BLE mesh, la estrategia seguida para la realización de este proyecto se basa en la búsqueda de varios estudios realizados por expertos en la materia con el objetivo de extraer conclusiones haciendo convergir distintos puntos sobre un tema.

Además, el enfoque será cualitativo debido a que se partirá de investigaciones y estudios ya realizados para extraer conclusiones y aplicaciones de la tecnología.

1.4. Planificación del Trabajo

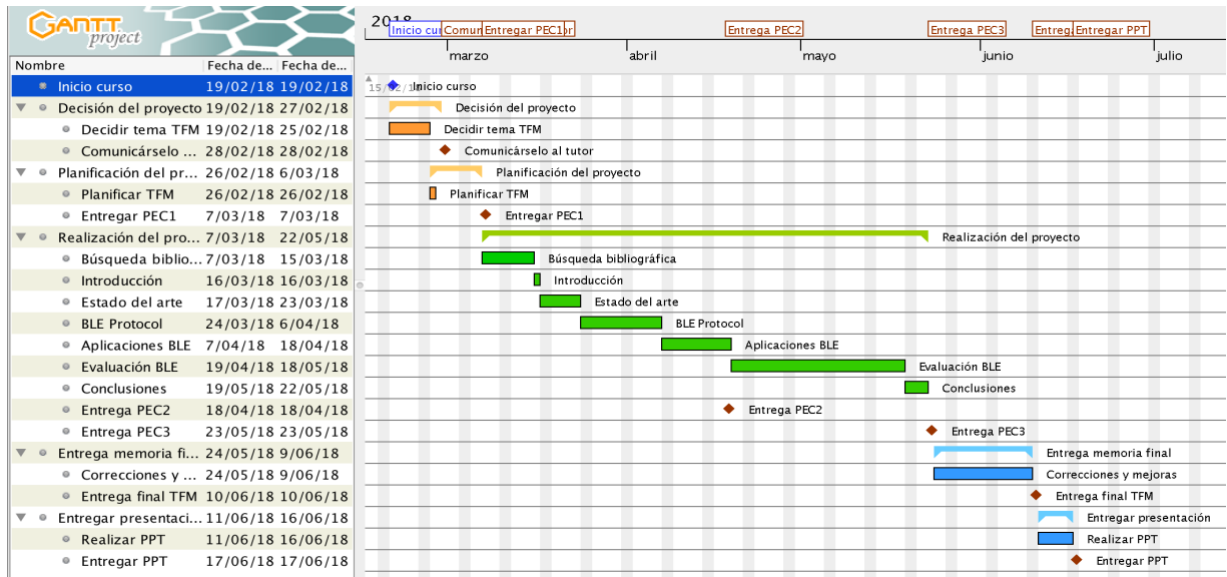
1.4.1. Recursos necesarios

Los recursos necesarios serán:

- Recursos humanos. En la realización de este proyecto han participado Ricardo Gabriel Portillo Criado, alumno encargado de realizar la investigación.
- Recursos materiales. Artículos y documentos de investigaciones realizados por expertos en el ámbito de las tecnologías inalámbricas.

1.4.2. Planificación temporal

La división y planificación de tareas en el tiempo se podrá observar en el siguiente Diagrama de Gantt.



1.5. Breve descripción de los otros capítulos de la memoria

En este subapartado detallaremos los contenidos que cubren la memoria, realizando una breve descripción de lo que abarcará cada uno de ellos.

1. Introducción. En este apartado que acabamos de tratar se han abordado las motivaciones que han llevado al desarrollo de este proyecto, la planificación del mismo y el objetivo que se quiere alcanzar con el proyecto.
2. Estado del arte. En este apartado se realizará una revisión sobre las tecnologías inalámbricas actuales en el ámbito de IoT. Además, se realizará un análisis de pros y contras (tanto a nivel técnico como económico) para justificar el uso de unas tecnologías frente a otras según el tipo de aplicación.
3. BLE Protocol. Este será uno de los apartados claves del proyecto en el que se definirá el protocolo Bluetooth Low Energy aplicado para redes mesh. Se hará un estudio exhaustivo del mismo.
4. Protocolos/Aplicaciones BLE a redes mesh. En este apartado abordaremos un estudio de las diferentes protocolos y/o soluciones de red existentes para las redes de malla BLE.

5. Evaluación del protocolo BLE. Apartado clave, en el que se partirán de diversos estudios y se extraerán conclusiones para resaltar los escenarios en los que BLE es aplicable y presenta ventajas frente a otras tecnologías inalámbricas, resaltando las limitaciones del mismo.
6. Conclusiones. En este apartado se indicarán las conclusiones extraídas del estudio realizado y líneas futuras.

2.Estado del arte

En este apartado se realizará una descripción de la situación actual del Internet de las Cosas, describiendo una a una las tecnologías inalámbricas más importantes, resaltando las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas, así como sus aplicaciones.

Con la aparición del IoT y el auge de las tecnologías inalámbricas, que permiten que dos equipos intercambien datos a través de una red sin la necesidad de una infraestructura cableada, (Industry, s.f.) aparece la necesidad de querer transmitir una mayor cantidad de datos a una mayor frecuencia y, además, que dichos dispositivos permanezcan siempre conectados a la red inalámbrica pero esto no se vea perjudicado ni en la duración ni en el tiempo de vida de su batería.

Por este motivo es por lo que el Internet de las Cosas [1] se ha popularizado en este tiempo debido a que es una tecnología de rápido crecimiento con oportunidades al unir las redes inalámbricas, Internet y computación. IoT permite conectar distintos tipos de dispositivos como vehículos, edificios o sensores inteligentes integrados y permite que estos objetos intercambien información entre ellos y recopilen datos.

Todo lo descrito anteriormente hace que cada vez sean más populares las ciudades inteligentes, la salud electrónica, las redes inteligentes, el comercio electrónico, el transporte inteligente y el comercio electrónico, etc, debido a que aprovechan todo el potencial de estas tecnologías inalámbricas.

2.1. Bluetooth

Bluetooth [2] es una tecnología dedicada a las Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN) creado por Special Interest Group. Esta tecnología, haciendo uso de la banda de 2.4GHz, es utilizada para la conectividad inalámbrica a corto alcance y posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace por radiofrecuencia.

La tasa de transferencia de datos entre dispositivos Bluetooth es de unos tres megabits por segundo. Que, en comparación con la tecnología WiFi (*IEEE 802.11*), es relativamente inferior.

Pero la tecnología Bluetooth presenta ciertas limitaciones, como por ejemplo el alcance, el cual se extiende a unas decenas de metros, o la posibilidad de sufrir interferencias debido a que al trabajar en la banda de 2.4 GHz (frecuencia de operación de otros dispositivos inalámbricos) puede conducir a problemas de red globales, como problemas de colisión al tratar de acceder al medio compartido con otras tecnologías en la misma banda de frecuencias (como *IEEE 802.11*), lo que puede producir que la información tenga que ser reenviada o incluso llegar a haber pérdidas.

Actualmente, la industria Bluetooth busca ampliar los casos de uso de la tecnología en los mercados de comunicaciones inalámbricas a corto alcance, como IoT o Máquina a Máquina (M2M) [3]. Pero, se encuentra con la necesidad, de que este tipo de aplicaciones requiere un bajo consumo de batería, para así alargar la vida útil del dispositivo. Para lograr esto el Grupo de Interés Especial de Bluetooth (SIG) introdujo Bluetooth Low Energy (BLE), que se especificó por primera vez en Bluetooth 4.0 y mejoró aún más en Bluetooth 4.1.

2.1.1 Bluetooth Low Energy (BLE)

Como se indicó en el subapartado anterior, el grupo SIG introdujo en 2010 una nueva especificación del protocolo a la que denominó Bluetooth Low Energy (BLE), también conocida como Bluetooth Smart [3]. BLE apareció con el objetivo de ampliar la tecnología Bluetooth al uso en dispositivos con limitaciones de energía, como sensores inalámbricos y controles inalámbricos, altamente utilizados en IoT. Además ofrece un soporte para las características de tráfico de este tipo de dispositivos, que se caracteriza por transmitir poca información y a poca frecuencia. Esta es la principal diferencia con la aplicación Bluetooth convencional, que es la transmisión de audio y datos.

Esta tecnología inalámbrica permite crear lo que se conoce como redes mesh (redes inalámbricas malladas), que son grandes redes de dispositivos utilizando conexiones de bajo consumo energético: cada nodo BLE consume 40mA transmitiendo y 0.2mA en reposo. Resaltar, además, que está especialmente dirigida a IoT, al ofrecer en su aplicación a redes mesh, una alternativa sencilla y económica a las enormes redes inalámbricas utilizando las bandas y protocolos WiFi. Ya que los dispositivos aprovecharían las ventajas de este tipo de red mallada para superar las distancias actuando cada uno como un repetidor.

En los siguientes apartados del proyecto profundizaremos más sobre esta nueva especificación en su aplicación a las redes mesh.

2.2. Zigbee

ZigBee [4] es una tecnología inalámbrica más centrada en aplicaciones domésticas e industriales. Tecnología inalámbrica basada en el protocolo IEEE 802.15.4, que opera, al igual que Bluetooth y BLE, en el rango de frecuencias de 2,4GHz, sin embargo, su tasa de transmisión es mucho más baja (250 Kbps). Por ello, se usa en aplicaciones que requieren comunicaciones con baja tasa de envío de datos dentro de áreas delimitadas con un alcance de 100 metros, como viviendas o edificios. Su última versión es la 3.0.

ZigBee presenta ciertas ventajas significativas como el bajo consumo en sistemas complejos (un dispositivo Zigbee consume 30mA transmitiendo y 3mA en reposo), alta seguridad, robustez, alta escalabilidad y capacidad para soportar un gran número de nodos (hasta 255). Por lo que se considera una de las tecnologías óptimas para las redes de sensores en aplicaciones IoT y M2M. La baja velocidad de datos de ZigBee toma mucha menos energía que otras tecnologías de red. Es por eso que la vida útil de la batería de un dispositivo

ZigBee a menudo se puede medir en años (hasta 2 años con baterías AA), en lugar de horas o días en el caso de Bluetooth.

Si comentamos un poco cómo opera ZigBee, su funcionamiento [5] se basa en el modo de sincronización, donde los dispositivos pueden ser "esclavos", la mayoría de las veces están en estado inactivo, para "despertarlos" periódicamente para recibir la señal de sincronización del coordinador de la red. El mecanismo para saber cuando transmitir se basa en determinar el estado del canal de comunicación, este mecanismo reduce significativamente las colisiones causadas por la transferencia de datos simultáneamente múltiples dispositivos.

Zigbee también presenta ventajas desde el punto de vista del cliente, la principal es su bajo costo de implementación debido a que los requisitos de memoria son pequeños.

2.3. Wi-Fi 802.11ah

IEEE 802.11 (Wi-Fi) [7] es una tecnología inalámbrica de corto alcance que se usa comúnmente para proporcionar conectividad de banda ancha. Orientado al IoT aparece la especificación IEEE 802.11ah, que resuelve desafíos como el ahorro de energía (cada nodo consume 400ma transmitiendo, 20ma en reposo, mayor rango de transmisión y un soporte para un mayor número de nodos o estaciones (STA).

El IEEE 802.11ah, también conocido como HaLow, es la única enmienda IEEE 802.11 para operar en bandas ISM sub-1 GHz. La principal diferencia con sus predecesores es que hace uso de la banda de los 900MHz para transmitir datos, por lo que duplica el alcance de los estándares que operan en 2.4GHz, usando menos potencia, llegando hasta 1 km (900 MHz).

Los anchos de banda de operación de los canales son 1, 2, 4 y 8 MHz, donde 1 y 2 MHz están destinados principalmente para casos de uso de IoT. Las velocidades típicas en un canal de 2 MHz varían de 650 Kbps a 7.8 Mbps, lo que hace pensar que es un estándar totalmente pensado para IoT y por ello no son necesarias altas velocidades de transmisión. Está optimizado para tener muchos nodos conectados a un mismo punto de acceso sin que cause saturación (8191)

Este estándar no está concebido para aumentar las velocidades de transmisión si no para tener interconectados un gran número elevado de nodos en el hogar (su principal caso de uso). Permite, además, un mayor control de las interferencias y pérdidas de señal, al trabajar en una frecuencia más baja (900MHz).

2.4. SigFox

SigFox [7] es una compañía francesa fundada en 2009 que proporciona el servicio de red de cobertura amplia de bajo consumo (LPWAN). Esta red inalámbrica fue diseñada para que funcione con dispositivos de bajo consumo energético (unos 5-45mA), como los sensores, y de bajas tasas de transmisión (hasta 0.3 Kbps). Por lo que hace que sea ideal para IoT. Con la única restricción que para que un dispositivo funcione en esta red se requiere que contenga un módulo de comunicación o un chip compatible con SigFox.

El funcionamiento de la red es similar a las redes móviles, al colocar varias estaciones receptoras y transmisoras, con la diferencia que cualquier estación puede recibir información y redireccionarla a la nube. Hace uso de la banda de 200 KHz, donde cada mensaje tiene un ancho de 100Hz, proporcionando un alcance del rango de kilómetros (30-50km) y una excelente cobertura. Además, la red de SigFox emplea las bandas direccionales de radio sin licencia ISM que son 902 MHz en Estados Unidos y 868 MHz en Europa y ofrece unos costes de despliegue muy bajos al costar cada módulo en torno a 20 céntimos.

SigFox hace uso de la tecnología UNB (Ultra Narrow Band). Esta tecnología consiste en hacer uso de canales estrechos del espectro de frecuencias para alcanzar grandes distancias minimizando la energía.

Cabe destacar, que tiene ciertos requisitos de seguridad por lo que la red cuenta con protocolos de encriptamiento VPN y emplea al final el protocolo https. Y, además, presenta ciertas desventajas como que la longitud máxima del mensaje que se puede transmitir está limitada a 12 octetos o que el número máximo de mensajes que se puede transmitir en un día es de 140.

En lo relacionado a su tarificación, ofrece distintos tipos de cuotas:

- Un pago único por activación, que escala en función del número de nodos. Oferta: 1-10 altas, 20€/ud; >10 altas, 14€/ud; >25 altas, 12€/ud; >100 altas, 10€/ud.
- Una cuota anual, la cual también depende del número de equipos. Oferta: 1 -10 equipos, 15 € año/ud; >10 equipos, 10 € año/ud; 25 equipos, 9 € año/ud; >100 equipos 8 € año/ud.

Como aplicaciones típicas, tenemos que SigFox aparece en edificios comerciales, en ciudades y en las casas de los usuarios debido a su gran cobertura. Unos casos de uso típicos de SigFos van desde las alarmas de incendios hasta gestión de control de instalaciones, en la monitorización de la salud del hogar hasta el control de visitas de los cuidados sociales, desde aparcamientos monitorizados hasta iluminación telecontrolada. La conectividad y cobertura que ofrece SigFox hace que tenga amplio rango de aplicaciones IoT.

2.5. LoRAWAN

LoRaWAN [8] es una especificación de red de área amplia de baja potencia (LPWAN) desarrollada por la LoRa Alliance con características específicas para soportar comunicaciones móviles, bidireccionales, económicas y seguras para aplicaciones de IoT, M2M, ciudades inteligentes y aplicaciones industriales.

La especificación LoRaWAN proporciona una interoperabilidad entre los diferentes dispositivos, lo que facilita los despliegues. Además, está optimizada para bajo consumo de energía y para ofrecer amplias redes con millones y millones de dispositivos, con velocidades de transferencia que van desde 0,3 kbps hasta 50 kbps con una longitud máxima de 242 octetos por mensaje. Su alcance es de unos 15 kilómetros, permitiendo llegar a zonas de difícil acceso.

Profundizando un poco en dicha especificación, LoRaWAN define el protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema, mientras que la capa física LoRa habilita el enlace de comunicación de largo alcance. La arquitectura de red LoRaWAN se presenta típicamente en una topología en estrella. Toda comunicación entre los dispositivos finales es generalmente bidireccional, pero también admite operaciones multidifusión (*multicast*). Esta comunicación entre los dispositivos finales y las puertas de enlace se distribuye en diferentes canales de frecuencia y velocidades de datos, la selección es una compensación entre el alcance y la duración del mensaje.

Al ser una tecnología de amplio espectro, las comunicaciones con diferentes velocidades de datos no interfieren entre sí. Las velocidades de datos de LoRaWAN van desde 0.3 kbps hasta 50 kbps. El servidor de red de LoRaWAN es el encargado de gestionar las velocidades de datos y salida de RF de cada dispositivo haciendo uso de un esquema de velocidades de datos adaptativo (ADR), con el objetivo de maximizar la duración de la batería de los dispositivos y la capacidad de la red.

La tecnología inalámbrica LoRa es ideal para ser utilizada en una amplia variedad de aplicaciones, al poderse utilizar donde se requiera extraer/enviar información o tener el control remoto de alguna cosa como pueden ser alarmas, contadores de agua, control de tráfico, etc. Entre algunas de sus aplicaciones más comunes se podrían destacar: IoT, Smart cities, redes de sensores, agriculturas inteligentes o aplicaciones de automatización industrial.

2.6. 6LoWPAN

6LoWPAN [9] (IPv6 Low-power wireless Personal Area Network) es una tecnología inalámbrica basada en IP. Este protocolo permite mecanismos de encapsulado y comprensión de cabeceras. Además, ofrece una libertad de uso de bandas de frecuencias y capa física, por lo que se puede utilizar Ethernet, Wi-Fi, 802.15.4 y sub-1GHz ISM.

6LoWPAN ofrece una topología en malla robusta, escalable y auto-regenerativa. Los routers pueden encaminar datos enviados a otros dispositivos, mientras que los hosts permanecen inactivos mucho tiempo.

Su principal característica es hacer uso de la pila IPv6, clave para el IoT, al aumentar el rango de direccionamiento y permitiendo que cualquier dispositivo conectado a la red disponga de su dirección IP.

Sus principales aplicaciones son el hogar y la automatización de edificios, ya que, proporciona mecanismos de transporte básico para sistemas de control complejos e interconexión de dispositivos de forma económica en una red de bajo consumo.

2.7. Redes celulares

Las redes celulares son pieza clave como habilitadoras del ecosistema del Internet de las Cosas, IoT, debido a su gran aplicabilidad a entornos IoT con más de 20 mil millones de conexiones. Además, gracias a su integración con la mayoría de los dispositivos móviles actuales y su gran despliegue (en 2015 el 95% de la población tenía cobertura de una red celular), es una clara candidata a ser altamente utilizada en entornos de IoT. Ya que, cualquier aplicación IoT que necesite funcionar en grandes áreas puede beneficiarse de las ventajas de la comunicación móvil GSM/3G/4G.

La red de telefonía móvil es capaz de enviar grandes cantidades de datos, especialmente a través de 4G. Pero aparece una de sus principales desventajas que son el consumo de energía y el coste económico de la conexión (en torno a 1€/MB contratado), que podrían ser demasiado altos para muchas aplicaciones que necesiten grandes cantidades de ancho de banda.

Sin embargo, puede ser ideal para proyectos que integren sensores y que no requieran un ancho de banda muy grande para enviar datos por Internet.

Además con la futura aparición del 5G, hace que las redes móviles tomen especial relevancia. Hasta ahora, sabemos que 5G [10] es una extensión de LTE y de todas las redes LTE-Avanzadas, aportando una arquitectura de red completamente nueva, tales como la virtualización de funciones de red, que ofrece altas velocidades de datos.

Se espera que esta quinta generación de tecnología de comunicaciones inalámbricas, llegue en 2020, lo que permitirá manejar aproximadamente 1000 veces más datos móviles que los sistemas celulares actuales. También se convertirá en la columna vertebral del Internet of Things (IoT), conectando dispositivos fijos y móviles, tales como máquinas expendedoras y automóviles, convirtiéndose, así, en parte de una nueva revolución industrial y económica.

2.8. Otras tecnologías/protocolos usados

En este subapartado se realizará una breve descripción de otras tecnologías o protocolos usados en IoT. Algunas, como por ejemplo, Thread, nos servirá para realizar la comparativa con BLEmesh, en cambio, las demás, se presentan con objetivos plenamente informativos.

2.8.1. NFC

Near Field Communication (NFC) [11] es una tecnología de comunicación inalámbrica, de corto alcance (centímetros) y alta frecuencia (13.56 MHz) que permite el intercambio de datos entre dispositivos. La velocidad de transmisión varía de los 100 a los 420 Kbps.

NFC permite dos vías simultáneas de interacción segura entre dispositivos electrónicos, siendo especialmente adecuada para smartphones, al permitir realizar pagos o acceder a contenidos digitales sin contacto o para la tecnología contactless de las tarjetas inteligentes permitiendo conexiones punto a punto y modos de funcionamiento activos y pasivos.

Los estándares de NFC cubren protocolos de comunicación y formatos de intercambio de datos, y están basados en ISO 14443 (RFID, radio-frequency identification) y FeliCa.1.

Debido a su limitación en número de nodos (sólo dos), hace que esta tecnología no sea lo más adecuada para una red de muchos nodos, por lo que sus aplicaciones se limitan en pagos con tarjetas o escaneo de códigos.

2.8.2. Thread

Thread [12] es un protocolo de red de malla basado en IPv6 diseñado como una solución de red confiable, de bajo consumo, segura y escalable para conectar dispositivos IoT. Trabaja en la banda de 2.4 GHz. Thread se basa en varios protocolos como IEEE 802.15.4, IPv6 y 6LoWPAN.

Es un protocolo diseñado para domótica, basado en 6LowPAN. Se diseñó como un complemento WiFi, puesto que aunque la tecnología Wi-Fi funciona muy bien en dispositivos de consumo, tiene limitaciones al utilizar en configuraciones de domótica. Diseñado, además, para trabajar sobre chips IEEE 802.15.4.

Thread es compatible con redes de topología de malla al utilizar radio transceptores IEEE802.15.4, siendo capaz de manejar hasta 250 nodos con altos niveles de autenticación y cifrado.

Thread junto con Zigbee serán los protocolos con los que se realizará la evaluación de BLEmesh debido a que es uno de los protocolos más usados en el caso de uso que nos centraremos que serán entornos interiores como casas o edificios inteligentes.

2.8.3. Z-Wave

Z-Wave [13] es una tecnología RF de bajo consumo, optimizado para la comunicación fiable de baja latencia, alcanza velocidades de datos de hasta 100kbit/s, opera en la banda de sub-1 GHz por lo que es robusta frente a interferencias de la banda de 2.4 GHz.

Es compatible con redes de topología de malla, no necesita un nodo coordinador y altamente escalable (hasta 232 dispositivos), con una duración de la batería de hasta 2 años. Y una de sus principales ventajas es su lo que permite una mayor rapidez en el desarrollo.

2.9. Tablas comparativas

En este subapartado se representarán dos tablas comparativas de los diferentes protocolos/tecnologías presentados anteriormente, en términos de bandas de funcionamiento, velocidades de transmisión y alcance de las mismas [14][15].

Como se puede observar en las tablas comparativas, dado por la buena velocidad de transmisión que ofrece y un su corto alcance para un despliegue de una red mesh de varios nodos (lo que hace que su alcance se limite al siguiente nodo) y, si sumamos, la gran escalabilidad que presenta (32mil dispositivos) y la larga duración de la batería en comparación con otras soluciones, hace que sea una solución ideal para el caso de uso en el que nos centraremos en este proyecto: entornos interiores (o indoor) como casa inteligentes y oficinas inteligentes.

| Tecnología | Estándar | Frecuencias | Velocidad de transmisión | Alcance |
|-------------------|---|---------------------------------------|---|--|
| Bluetooth | Bluetooth 4.2 (BLE) | 2.4 GHz (ISM) | 1Mbps | 50-150m (BLE) |
| Zigbee | ZigBee 3.0 basado en IEEE 802.15.4 | 2.4 GHz | 250 Kbps | 10-100m |
| 802.11ah | WiFi HaLow 802.11ah | 2.4 GHz, 5 GHz y 900MHz | 150 Kbps - 346 Mbps | 1 km (900 MHz) |
| SigFox | SigFox | 900 MHz | 0.3 Kbps | 30 km (urbano) – 50 km (rural) |
| LoRaWAN | LoRaWAN | Varias | 0.3 – 50 Kbps | 5 km (urbano) – 15 km (rural) |
| 6LoWPAN | RFC6282 | Adaptable a 2.4 GHz o RF bajo consumo | N/A | N/A |
| Redes celulares | GSM/GPRS/EDGE (2G), UMTS/HSPA (3G), LTE (4G) y 5G | 900 / 1800 / 1900 / 2100 MHz | 35-170kps (GPRS), 120-384kbps (EDGE), 384Kbps-2Mbps (UMTS), 600kbps-10Mbps (HSPA), 3-10Mbps (LTE) | hasta 35km para GSM; hasta 200km para HSPA |
| NFC | ISO/IEC 18000-3 | 13.56MHz (ISM) | 100-420 Kbps | 10cm |
| Thread | Basado en IEEE 802.15.4 y 6LowPAN | 2.4 GHz (ISM) | N/A | N/A |
| Z-Wave | Z-Wave Alliance ZAD12837 / ITU-T G.9959 | 900 MHz (ISM) | 9.6, 40, 100 Kbps | 30m |

Tabla 1 - Tabla comparativa de las tecnologías IoT (I)

| Tecnología | Número máximo de nodos | Duración batería | Aplicaciones /Casos de uso |
|-------------------|-------------------------------|---|--|
| Bluetooth | 32000 | hasta 2 años sin interrupción | Automatización de edificios industriales y casas inteligentes, redes de sensores de gran envergadura, localización seguimiento de personas |
| Zigbee | 65,000 | 6 meses a 2 años | Smart Home, ciudades inteligentes, aplicaciones domótica, industrias, campos de cultivo inteligentes |
| 802.11ah | 8191 en un mismo AP | días | Industrias IoT, Smart Home, edificios inteligentes |
| SigFox | N/A | 6 a 10 años | Aplicaciones M2M, parkings inteligentes, seguimiento de personas, vehículos para control de tráfico, ciudades inteligentes |
| LoRaWAN | N/A | 7 a 12 años | Aplicaciones M2M |
| 6LoWPAN | N/A | 1-2 años | Aplicaciones sanitarias (Healthcare), Industrialización, campos de cultivo inteligentes, vehículos inteligentes |
| Redes celulares | N/A | días | Transporte conectado, ciudades inteligentes, redes eléctricas inteligentes, redes de medidores y sensores |
| NFC | 2 | No suele estar siempre activo pero consume 50mA aproximadamente | Pagos seguros con tarjetas de crédito, códigos QR, tarjetas de acceso a edificios, pagos en parkímetros. |
| Thread | 250-300 | 6 a 10 años | Automatización de edificios y Smart Homes, aplicaciones domóticas |
| Z-Wave | Hasta 232 | Hasta 2 años | Automatización de edificios y Smart Homes, aplicaciones domóticas |

Tabla 2 - Tabla comparativa de las tecnologías IoT (II)

3. Bluetooth Low Energy Protocol

En este apartado se profundizará en la tecnología Bluetooth Low Energy (BLE), realizando una breve introducción a los orígenes de la misma. Después, se pasará a realizar un estudio en profundidad de sus capas física y de enlace, como los mecanismos de acceso al medio, el espectro de frecuencias que utiliza, así como su formato de trama. Todo ello orientado a redes mesh, que son redes cuya usabilidad se incrementará conforme IoT aterrice en la sociedad. Es por ello por lo que se hablará de BLEmesh, que es un protocolo para redes mallas inalámbricas que hace uso de la capacidad de difusión o broadcast de las transmisiones inalámbricas.

Durante este estudio, se resaltarán las limitaciones de la tecnología.

3.1. Introducción a BLE

Bluetooth es un protocolo de comunicación inalámbrico desarrollado originalmente por Ericsson que opera sobre frecuencia sin licencia. Se concibió para Redes de Uso Personal (PAN) con el propósito de transferir datos de manera inalámbrica. Sin embargo, presenta limitaciones intrínsecas de diseño: requiere emparejar los dispositivos en conexión, su consumo de energía es elevado y su alcance es de decenas de metros. Estas limitaciones, hicieron que Nokia desarrollara una nueva evolución del estándar llamado Bluetooth Low-Energy (BLE o Bluetooth LE o Bluetooth Smart).

Esta evolución también fue necesaria para ampliar las distintas aplicaciones de la tecnología a los mercados de comunicaciones inalámbricas de corto alcance además de las comunicaciones de audio y estéreo, como las comunicaciones de Internet de las cosas (IoT) y de máquina a máquina (M2M). Es por ello que Grupo de Interés Especial de Bluetooth (SIG), introdujo por primera vez en 2010 Bluetooth Low Energy (BLE), que se especificó por primera vez en Bluetooth 4.0 y mejoró aún más en Bluetooth 4.1

Como se ha comentado anteriormente, BLE se introdujo con el objetivo de ampliar la aplicación de la tecnología Bluetooth para su uso en dispositivos con limitaciones de energía, como sensores inalámbricos y controles inalámbricos. Es una tecnología de transmisión inalámbrica de corto alcance diseñada para comunicaciones de baja potencia de bajo costo y baja complejidad que ofrece propiedades interesantes para redes de sensores inalámbricos industriales (IWSN) [16]. BLE reduce significativamente el consumo de energía (cada dispositivo BLE consume 16mA de media), lo que alarga la vida útil de las baterías, permitiendo un funcionamiento sin interrupción de hasta 2 años seguidos. Además, BLE ofrece mejoras como una latencia más baja y un mayor alcance.

Pero no solo la aplicación en los sensores y controles requiere un bajo consumo de energía, sino que la cantidad de transmisión de datos es pequeña (del orden de Kbps) y la comunicación ocurre con poca frecuencia, debido a que en las redes de sensores puede que se maneje la información sobre una medición una vez o dos al día. Esto es diferente de la aplicación Bluetooth convencionales, como transmisión de audio y datos, con grandes cantidades de transmisión de datos e interacción frecuente entre dos dispositivos de comunicación.

Una de sus principales limitaciones es que BLE presenta inconvenientes con el tráfico en tiempo real, al crear ciertos retrasos en los mensajes (del orden de ms). Otra de sus limitaciones, relativa a la distancia entre los nodos y a la topología de la red, es que existen ciertas dificultades a la hora de querer crear una red mesh (mallada) BLE con múltiples saltos. Estas limitaciones reducen el grado en que se puede expandir la cobertura de una red BLE.

Para superar estas limitaciones y al mismo tiempo mantener las ventajas de las comunicaciones de bajo consumo y bajo costo, existen protocolos como Real-Time BLE (RT-BLE), un protocolo en tiempo real para redes de malla inalámbricas industriales desarrolladas sobre BLE.

Antes de continuar con la introducción a BLE, se considera oportuno realizar una explicación de en qué consiste una red mesh (o red mallada). Una red inalámbrica mesh es una topología de red en la que cada dispositivo inteligente (por ejemplo, teléfono inteligente o tablet) transfiere los datos a la red. Todos los dispositivos que conforman esta red inalámbrica cooperan entre sí para compartir los datos en la red.

3.1.1. Redes mesh

Se espera que las redes mesh (o redes malladas) jueguen un rol importante en el ámbito de Internet de las Cosas, IoT. De forma simplificada, una malla conecta cada nodo con otros nodos que forman parte de la red, de manera que pueden comunicarse directamente unos con otros, sin necesidad de usar dispositivos como routers o switches.

En la imagen se muestran dos modos de conexión de una red mallada [17]: conexión parcial o total.

- En una malla con conexión parcial, los nodos se conectan de forma indirecta a otros dispositivos.
- En una malla completa, cada nodo se conecta al resto de nodos que forman la malla.

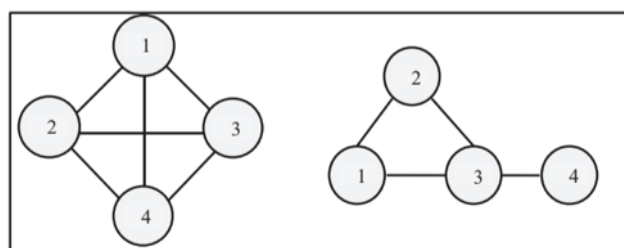


Figura 1 - Modos de conexión redes mesh: malla conexión completa, izquierda, y malla conexión parcial, derecha [17]

Este tipo de redes, se suele utilizar para extender el área de cobertura de las redes, al formar una red descentralizada en la que cada nodo sólo necesita extender su rango de cobertura hasta el siguiente nodo. Este tipo de redes, permite que un nodo pueda llegar a cada nodo por diferentes caminos, por lo que evita la existencia de un único punto de fallo. Esto es que, si un nodo falla, el resto pueden seguir comunicándose entre ellos de forma directa, o mediante nodos intermedios.

Por otra parte, las redes malladas presentan algunos inconvenientes, como la alta probabilidad de replicar los datos que se envían y se reciben en la red. Además, como los diferentes algoritmos para mallas son incompatibles entre sí, no resulta interoperable (por ejemplo, la capa física de Bluetooth Mesh y la de Zigbee son distintas, por lo que no son compatibles).

El modo de funcionamiento de una red mallada consiste en la difusión de paquetes (flooding). De esta forma, se garantiza que el paquete transmitido por un nodo se reciba en todos los nodos que se encuentran dentro del área de cobertura. Los paquetes recibidos se van reenviando entre los distintos nodos intermedios hasta que alcanzan el nodo destino. Aquí se puede observar el inconveniente presentado anteriormente, debido que existe una alta probabilidad de que al nodo final lleguen paquetes duplicados, debido a las técnicas de difusión utilizadas.

En cambio, una de las principales características y ventajas, debido a su simplicidad, de una red mallada es que es posible añadir nuevos nodos sin que afecten a los que se encuentran en funcionamiento (self-forming), simplemente empiezan a transmitir y recibir datos como el resto de nodos de la red.

Otra característica destacada, tal y como se ha introducido anteriormente, es que una red mallada es robusta, ya que si se produce un fallo en un nodo, los datos se transmiten mediante otra ruta disponible (self-healing).

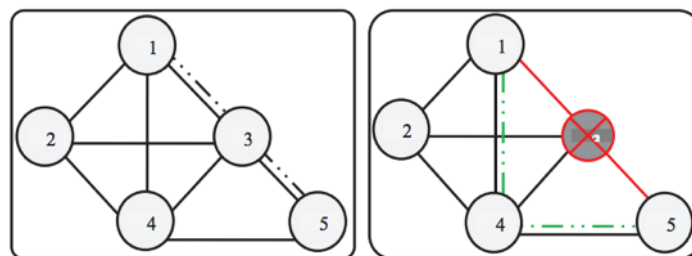


Figura 2 - Robustez redes mesh, ejemplo [17]

En la figura anterior se puede observar un ejemplo de lo explicado anteriormente. Se puede observar en la imagen de la izquierda una red mesh en la que el nodo 1, envía datos al nodo 5, a través del nodo 3. Ahora, si suponemos que el nodo 3 falla por una caída de tensión o simplemente un fallo de conexión, imagen de la derecha, el nodo 1 puede seguir enviándole paquetes al nodo 5, pero ahora a través del nodo 4.

En este tipo de redes, los nodos al hacer uso de una clave de red conocida para encriptar mensajes, se afilian a una red específica. Una desventaja de la simplicidad de este método es el tamaño requerido del ciclo de escaneo. El escaneo continuo o caso continuo va en contra de la base original del protocolo BLE (bajo consumo). Únicamente hay una forma de cumplir el comportamiento previsto usando CSRmesh sin perder calidad de servicio (QoS). De esta forma, los dispositivos solo pueden funcionar como puntos finales de red y como remitentes de mensajes, de forma similar a los dispositivos con funciones reducidas existentes en IEEE 802.15.4 (ZigBee).

Aunque se comentará más adelante, existen protocolos basados en BLE orientados a redes mesh como BLEmesh o CSRmesh.

Con BLE es posible formar redes malladas debido a que un dispositivo BLE puede ser un maestro en una red y puede actuar como un esclavo en otra red. En la mayoría de las técnicas de enrutamiento existentes en redes inalámbricas se supone que todos los nodos son estáticos y no cambian sus posiciones hasta el final de la red. Aunque no es una suposición realista, elimina los efectos de la movilidad de los nodos en el enrutamiento de los datos.

3.2. BLE conceptos básicos

Como se ha comentado en párrafos anteriores BLE amplía el rango de aplicaciones de la tecnología Bluetooth convencional, que era la transmisión de grandes paquetes de audio y datos y la interacción frecuente entre dos dispositivos de comunicación. Además, con la aparición del IoT se le da una mayor importancia al costo del dispositivo. Para abordar estos requisitos de aplicación, BLE presenta una nueva radio y nuevas interfaces.

3.2.1. BLE: Capa física

En Bluetooth Classic [3], hay 79 canales, cada uno con un ancho de banda de canal de 1 MHz y una tasa de símbolo en bruto de 1 Msymbol / s. El esquema de modulación podría ser la modulación de desplazamiento de frecuencia gaussiana (GFSK), la clave de desplazamiento de fase en cuadratura (4PSK) o 8PSK. En cambio, el esquema de modulación utilizado en BLE es GFSK con velocidad de datos en bruto de 1 Msymbols / s ,y con ancho de banda de canal de 2 MHz (el doble de Bluetooth Classic).

Debido al aumento en el ancho de banda del canal a 2MHz, en la Capa Física de BLE hay un total de 40 canales en BLE, tres de ellos son canales de señalización y 37 de ellos son canales de datos. En la siguiente imagen se puede observar la distribución de canales de BLE.

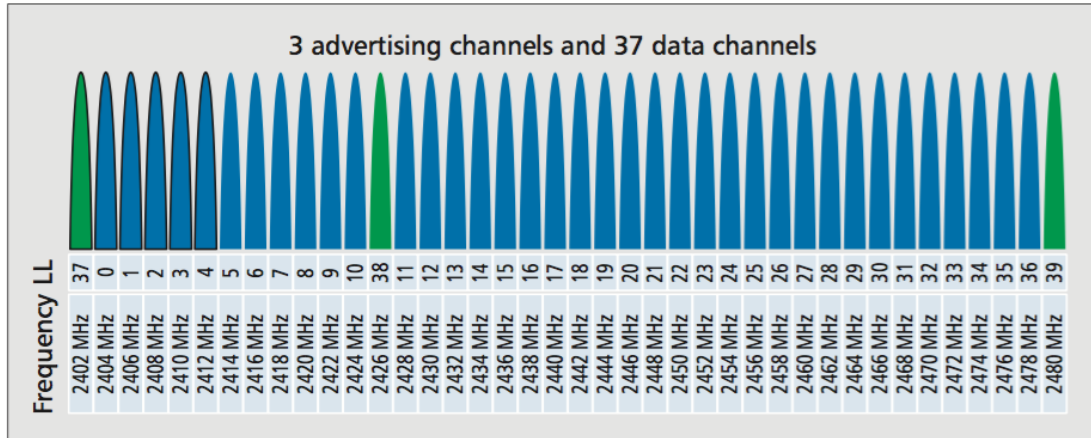


Figura 3 - BLE: Distribución de canales [3]

Se puede observar que existen dos tipos de canales:

- Canales de señalización. Estos tres canales se utilizan en la fase de descubrimiento de dispositivos y en el establecimiento de una comunicación inicial entre dos dispositivos, que incluye intercambios de parámetros requeridos.
- Canales de datos. Estos 37 canales son a través de los cuales ocurre la comunicación una vez que se conectan dos dispositivos.

Cabe destacar, que debida a la gran importancia de los canales de señalización, que son los encargados de establecer el canal de comunicación, estos canales trabajan en esas frecuencias porque sufren menos interferencia de las comunicaciones Wi-Fi, la cual también trabaja en la banda de 2.4 GHz.

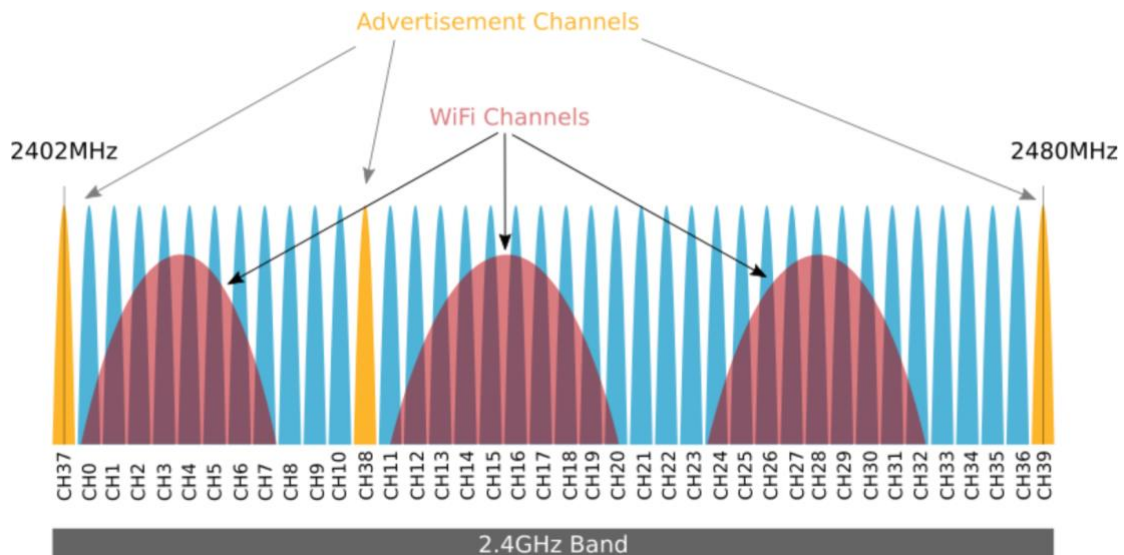


Figura 4 - BLE. Canales BLE y WiFi [18]

Como se puede observar en la Figura 3, los canales 37, 38 y 39 están repartidos en el espectro de 2,4 GHz a propósito. 37 y 39 son los primeros y últimos canales en la banda, mientras que 38 están en el medio. Esta distribución se hace así para lograr que si se bloquea un solo canal de señalización, la probabilidad de que los demás canales estén libres se mucho mayor, al estar separados por unos pocos MHz de ancho de banda.

Esto es especialmente cierto [18] ya que la mayoría de los otros dispositivos que interfieren con BLE son de banda estrecha (NB, narrow band). El canal 38 en particular se colocó entre los canales de Wi-Fi 1 y 6 por lo que evita la señal de Wi-Fi. El amplio espacio de los canales de señalización ayuda a BLE a gestionar mejor ls interferencias Wi-Fi, Bluetooth clásico, microondas, etc.

3.2.2. BLE: Formato trama

BLE está diseñado para que dos dispositivos puedan conectarse rápidamente. Permitiendo así, minimizar los riesgos y la posibilidad de errores. Es por ello, que las transacciones en BLE, como la mayoría de las transacciones en redes de sensores inalámbricos, solo requieren una pequeña cantidad de intercambio de datos. Es por lo que la trama BLE está formada por:

- 1 byte de preámbulo
- 4 bytes de códigos de acceso
- 3 bytes de código de redundancia cíclica (CRC)
- 2 a 39 bytes de unidad de datos de protocolo (PDU)

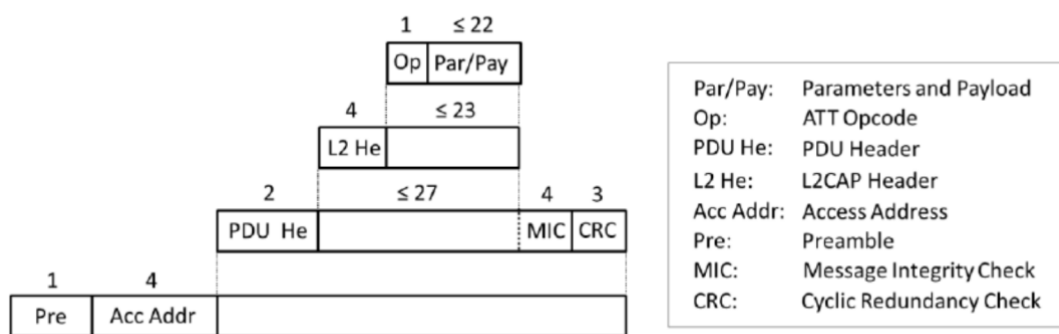


Figura 5 - BLE: Formato trama [19]

Con este tamaño de paquete, un paquete más corto se puede transmitir en 80 ms y un paquete más largo se puede transmitir dentro de 300 ms. Con un tamaño de paquete corto, BLE cumple con varios de los requisitos fundamentales que son los requisitos del ciclo de trabajo bajo, que es muy importante para las aplicaciones de red de sensores inalámbricos.

3.2.3. BLE: Pila de protocolos

Además de los cambios introducidos en el espectro de frecuencias y en el formato de la trama, otra pieza importante de BLE es la pila de protocolos, la cual está estructurada para facilitar las comunicaciones IP, lo que es ideal para IoT, y para reducir el consumo de energía.

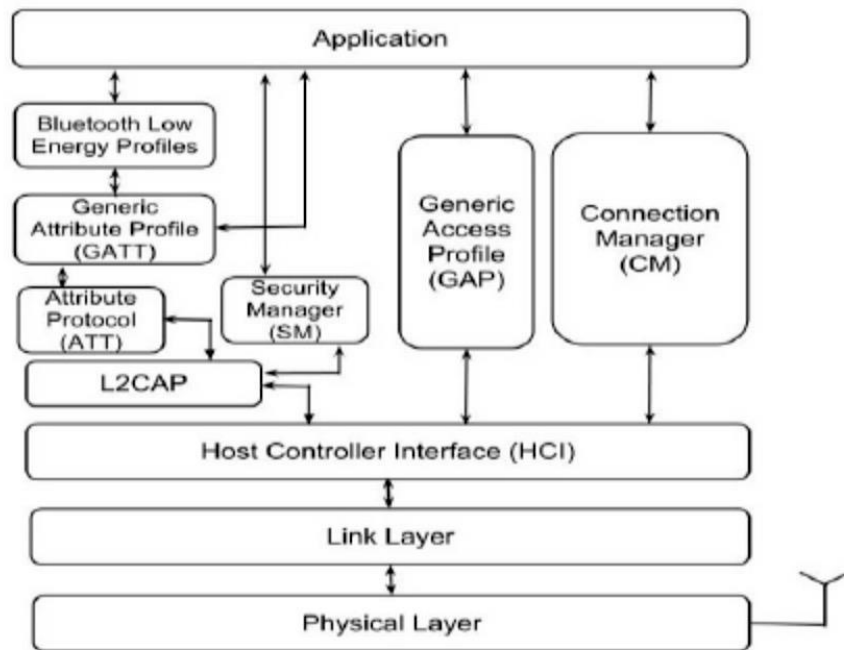


Figura 6 - BLE: Pila de protocolos [20].

En las siguientes líneas se dará una pincelada de las funcionalidades de cada nivel de la pila de protocolos. Se omitirá la Capa Física, debido a que ya se ha hablado del formato de trama y del espectro de frecuencias utilizado por BLE, y la Capa de Enlace, que se abordará en subapartados posteriores.

Una pila BLE típica consta de 2 partes principales, una se llama la parte del controlador, mientras que la otra se llama parte del host. La parte del controlador normalmente consta de la capa física y de enlace (implementada en forma de un SoC (System-On-Chip) con una radio integrada) mientras que la parte host se ejecuta en un procesador de aplicaciones

La parte del host incluye funcionalidades de capa superior como:

- Protocolo de Control y Adaptación de Enlace Lógico (L2CAP). BLE utiliza una versión más ligera del protocolo que la que se definió para el Bluetooth clásico. La principal tarea del L2CAP es cuidar la multiplexación de datos de los tres protocolos de capa superior: Protocolo de Atributos (ATT), Protocolo de Gestión de Seguridad (SMP) y Control de Señalización de la Capa de Enlace (*Link Layer control signaling*). En este contexto, el L2CAP realiza tareas para que los datos de estos servicios se transmitan al siguiente salto sin usar mecanismos de

retransmisión y control de flujo disponibles en versiones anteriores de Bluetooth. Otra característica que se elimina de la versión anterior de Bluetooth en el BLE L2CAP es la segmentación y el reensamblaje bajo la suposición de que los protocolos de capa superior proporcionan PDU que se ajustan al tamaño máximo de carga L2CAP, que es igual a 23 bytes en BLE [20].

- Control de Atributo (ATT). ATT permite a un servidor de atributos exponer los atributos y sus valores asociados a un cliente de atributos. Está optimizado para tamaños de paquetes pequeños.
- Perfil de Atributo Genérico (GATT). GATT describe un marco de servicios que utiliza ATT para descubrir servicios y leer y escribir valores característicos en un dispositivo. Los perfiles son simples y eficientes, por lo que pueden minimizar el tamaño del intercambio de datos entre dispositivos y, por lo tanto, reducir el consumo de energía.
- Protocolo de Gestión de Seguridad (SMP). Este protocolo se encarga del emparejamiento de dispositivos y la distribución de claves, y está diseñado para minimizar los requisitos de recursos para dispositivos esclavos al cambiar la carga de trabajo a dispositivos maestros más potentes
- Perfil de Acceso Genérico (GAP). GAP define los procedimientos genéricos para descubrir dispositivos BLE y gestionar las conexiones entre dispositivos LE.

La comunicación entre el host y la parte del controlador está estandarizada como la Interfaz del Controlador del Host (HCI). Este nivel es similar a Bluetooth Classic. Se encarga de separar la parte del controlador (enlace y capas físicas) de la parte de host L2CAP, ATT, GATT y GAP.

BLE tiene dos roles GAP: el rol central BLE y el rol periférico BLE. El rol central puede gestionar múltiples conexiones simultáneas con una serie de dispositivos en el rol periférico. Normalmente, un periférico está conectado a una única central, pero está modificado para poder conectarse a múltiples centrales en Bluetooth 4.1. Este cambio es necesario si Bluetooth desea operar y funcionar correctamente en redes mesh.

3.2.4. BLE: Modos de comunicación y tipos de nodos

Bluetooth Low Energy tiene dos formas de comunicarse. La primera de ellas es haciendo uso de anuncios, donde un dispositivo periférico BLE transmite paquetes a todos los dispositivos que lo rodea (*broadcast*) y, el dispositivo receptor, puede actuar sobre esta información o conectarse para recibir más información. La segunda forma de comunicarse es recibir paquetes usando una conexión, donde tanto los nodos periféricos como los centrales envían paquetes.

La más utilizada es la primera de ellas, hacer uso de anuncios en los canales de señalización debido a que la mayoría de los nodos BLE permanecen en reposo (“dormidos”) la mayor parte del tiempo, despertando solo para anunciarse y conectarse cuando sea necesario. De aquí se puede concluir, que los anuncios tienen un gran impacto en el consumo de energía.

Cabe destacar, que el envío de anuncios por los canales de señalización es por diseño unidireccional. Un dispositivo central no puede enviar datos al dispositivo periférico sin una conexión. Pero un solo periférico puede anunciar a varios maestros en el área.

Una vez explicados los modos de comunicación, pasamos a definir los tipos de nodos BLE. La capa de enlace en BLE define los nodos que conforman la red como un maestro o un esclavo, que actúan iniciador o anunciante, respectivamente, durante el establecimiento de la conexión.

Un maestro puede conectarse a tantos esclavos como sea posible, formando así una red en estrella. En la operación de rutina básica, los esclavos pasan al modo de reposo y, periódicamente, salen de ese modo reposo para escuchar cualquier petición del nodo maestro. Es por ello que el nodo maestro es quien, generalmente, determina los períodos de sueño / escucha de los esclavos.

Es por ello que existe un nodo anunciante (*advertiser*) que transmite paquetes de señalización a través de los canales de señalización a ciertos intervalos de tiempos, denominados intervalos de anuncio (*advertising interval*); y un nodo escáner (scan), cuya función es escuchar y recibir datos de los canales de señalización.

El intervalo de anuncio es fijo y tiene un retraso aleatorio. Diferentes estudios [18] establecen el intervalo fijo de 20ms a 10.24 segundos, en pasos de 0.625ms. El retraso aleatorio es un valor pseudoaleatorio de 0 ms a 10 ms que se agrega automáticamente. Esta aleatoriedad ayuda a reducir la posibilidad de colisiones entre los anuncios de diferentes dispositivos. Esta es solo otra forma en que Bluetooth Smart usa para mejorar la solidez.

El intervalo de anuncio es independiente del intervalo de conexión. Por lo tanto, el hecho de que su dispositivo sea más lento para formar una conexión no le impide enviar datos rápidamente una vez que se establece la conexión.

Los dispositivos BLE primero necesitan conectarse entre sí antes de comenzar una comunicación bidireccional fiable. Esta fase de conexión entre los dos dispositivos es un procedimiento asimétrico en el cual el nodo anunciante transmite paquetes de señalización en los canales de señalización, mientras que el otro dispositivo escucha estos paquetes. Al recibirlos, el iniciador transmite un mensaje de solicitud de conexión al nodo anunciante permitiéndole así que se establezca la conexión, que es un enlace punto a punto entre ambos nodos.

3.2.5. BLE: Capa de enlace

A nivel de capa de enlace, BLE forma una red con topología en estrella, con un maestro que orquesta la comunicación bidireccional con uno o varios esclavos. Los nodos tienen diferentes estados de capa de enlace: publicidad (advertising), escaneo (scanning) y conexión (connection).

- Un dispositivo en el estado de publicidad (típicamente un nodo de baja potencia) transmite periódicamente paquetes a través de los canales de señalización (37, 38, 39 en 2.4GHz).
- Un dispositivo en el estado de escaneo (por ejemplo, un teléfono inteligente) escucha en estos canales de señalización, esperando dichos paquetes. Al recibir un anuncio, el dispositivo de exploración puede iniciar una conexión con un paquete en el que solicita la conexión. De este modo, el dispositivo de publicidad se convierte en el esclavo y el dispositivo de escaneo en el maestro.

En BLE una vez que se establece una conexión [16], como se ha comentado anteriormente, se definen dos roles: maestro y esclavo. El maestro coordina el acceso al medio adoptando un mecanismo de sondeo basado en TDMA, en el que periódicamente sondea a los esclavos. En BLE, el tiempo se divide en unidades llamadas eventos de conexión (CE). En cada evento de conexión se realiza un salto en frecuencia, es decir, en cada CE se usa un canal diferente para transmitir.

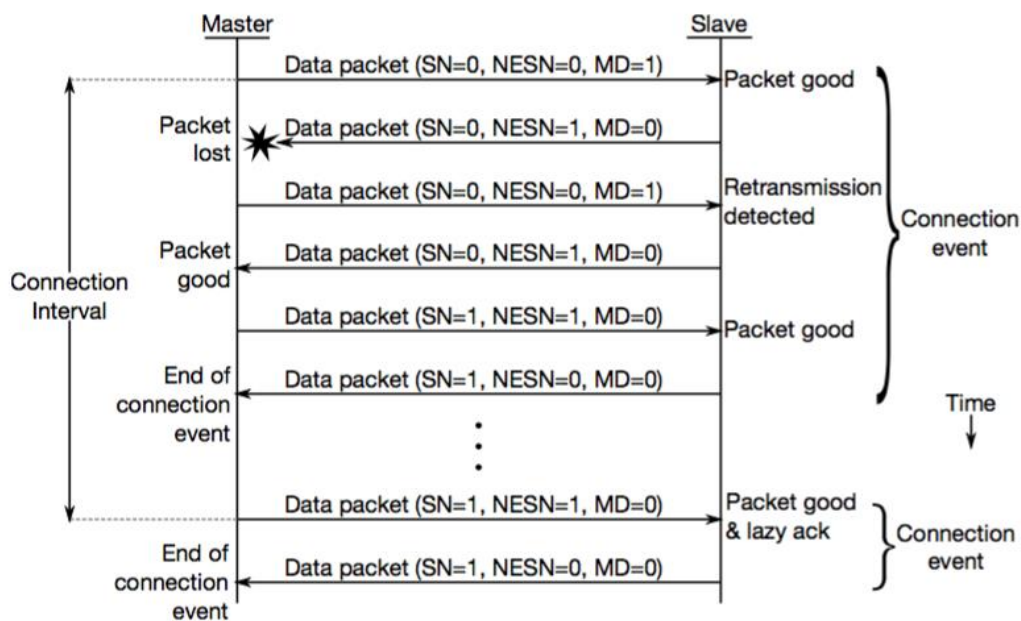


Figura 7 - Eventos de conexión e intervalos de conexión en BLE [22].

El evento de conexión comienza con la transmisión de un paquete de datos del maestro a un esclavo. La hora de inicio de un CE se llama punto de anclaje (AP). Los tiempos de inicio de los eventos de conexión se espacian regularmente, con un intervalo configurable denominado intervalo de conexión (CI). Durante un evento de conexión, el maestro y un esclavo transmiten y reciben paquetes alternativamente. El evento de conexión se considera abierto siempre que los dispositivos continúen transmitiendo paquetes.

En el caso de que ninguno de los dispositivos tuviese datos para transmitir, el esclavo cambia al modo de espera hasta el próximo AP. En este punto, el maestro inicia la comunicación con otro esclavo y el proceso se repite hasta que todos los esclavos han transmitido.

Una vez todo los esclavos hayan transmitido, el maestro también se queda dormido hasta que comience el próximo evento de conexión. De esta manera, el maestro básicamente divide el intervalo de conexión en tantos eventos de conexión como la cantidad de conexiones.

Un ejemplo típico de acceso al medio compartido de BLE puede mostrarse en la siguiente figura.

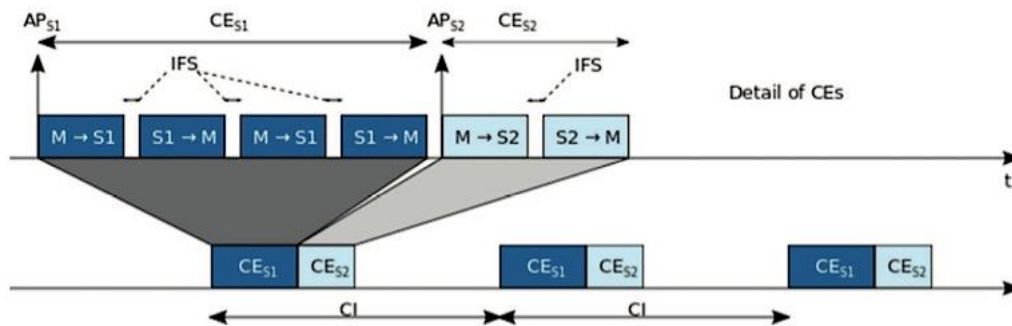


Figura 8 - BLE mecanismo de acceso al medio [16]

Las transmisiones consecutivas de paquetes están separadas por un Interframe Space (IFS) cuya duración es de 150 s. En la Figura 8 se puede observar un ejemplo en el que hay dos esclavos (S1 y S2) y un maestro (M). Donde, a línea inferior indica los eventos de conexión para el esclavo S1 y S2, que se repiten periódicamente con un período igual a CI, y la línea superior presenta los detalles de cada evento de conexión.

En el punto de anclaje de S1 (AP_S1), el maestro transmite un paquete a S1, iniciando así el sondeo y la secuencia de transmisión alterna (M-> S1, S1-> M, etc.). Al final del CE_S1, el maestro inicia el evento de conexión para el S2 (CE_S2), que se repite periódicamente con un período igual a CI.

Se puede observar que mientras que el CI es el mismo para todos los esclavos conectados al mismo maestro, los puntos de anclaje relevantes se desplazan, ya que el maestro sondea un esclavo a la vez. Además, el esclavo siempre debe enviar una respuesta al maestro por cualquier paquete recibido, sea este válido o no. El ack para el anterior el paquete se transmite dentro del encabezado de la respuesta al maestro.

La especificación BLE también define un parámetro, llamado Latencia de Conexión Esclava (Connection Slave Latency), que especifica el número de CE consecutivos que un esclavo debe omitir mientras permanece en modo de suspensión.

4. Protocolos/Aplicaciones BLE a redes mesh

Como se ha comentado en apartados anteriores, Bluetooth Low Energy (BLE), se ha convertido en una de las principales tecnologías inalámbricas de baja potencia. Gracias a la reutilización de los circuitos clásicos de Bluetooth, BLE ha ganado una posición dominante en los teléfonos inteligentes. Permitiendo comunicaciones de bajo consumo entre dispositivos móviles y sensores.

Además, un avance en los últimos años ha sido el soporte para IPv6, desarrollado por el IETF, lo que facilita la conectividad de los dispositivos BLE con el Internet of Things (IoT).

Aunque BLE parece una tecnología óptima para IoT, también presenta una serie de desafíos. Uno de sus principales inconvenientes es la limitación de la cobertura que ofrece al ser diseñado topologías de red en estrella. Esta limitación ocurre en, por ejemplo, las redes inalámbricas de automatización del hogar (WHAN) que a menudo requieren topologías de malla para permitir la comunicación entre dos dispositivos finales en un hogar. Por esta razón, tecnologías como IEEE 802.15.4 (y por lo tanto Zigbee o Thread) o Z-Wave, que soportan redes de malla, se están utilizando en WHANs Sin embargo, en un dominio tan relevante, BLE solo se puede usar para aplicaciones de enlace punto a punto.

Este apartado, por tanto, se basa en llevar a cabo una explicación de los dos enfoques principales propuestos por la comunidad con el fin de hacer frente a las limitaciones de cobertura existentes de la red BLE. El primer enfoque se basa en la reducción del ancho de banda de la señal de capa física BLE para aumentar el alcance del enlace mientras se mantiene el modelo de red de topología en estrella, como en la especificación Bluetooth 5.0 publicada recientemente. Mientras que, el segundo, se basa en permitir el funcionamiento de BLE en redes mesh (redes malladas), superando así, las limitaciones en cuanto la topología en estrella. Para esta adaptación de BLE a que funcione con redes mesh se requiere de ciertos mecanismos de este tipo de redes para permitir la comunicación extremo a extremo que tienen en cuenta características como la cobertura y la ruta.

Además, en este apartado abordaremos un estudio de las diferentes protocolos y/o soluciones de red existentes para las redes de malla BLE. Diversos estudios [23], dividen las soluciones identificadas en tres categorías, a saber: soluciones estandarizadas, soluciones académicas y soluciones patentadas.

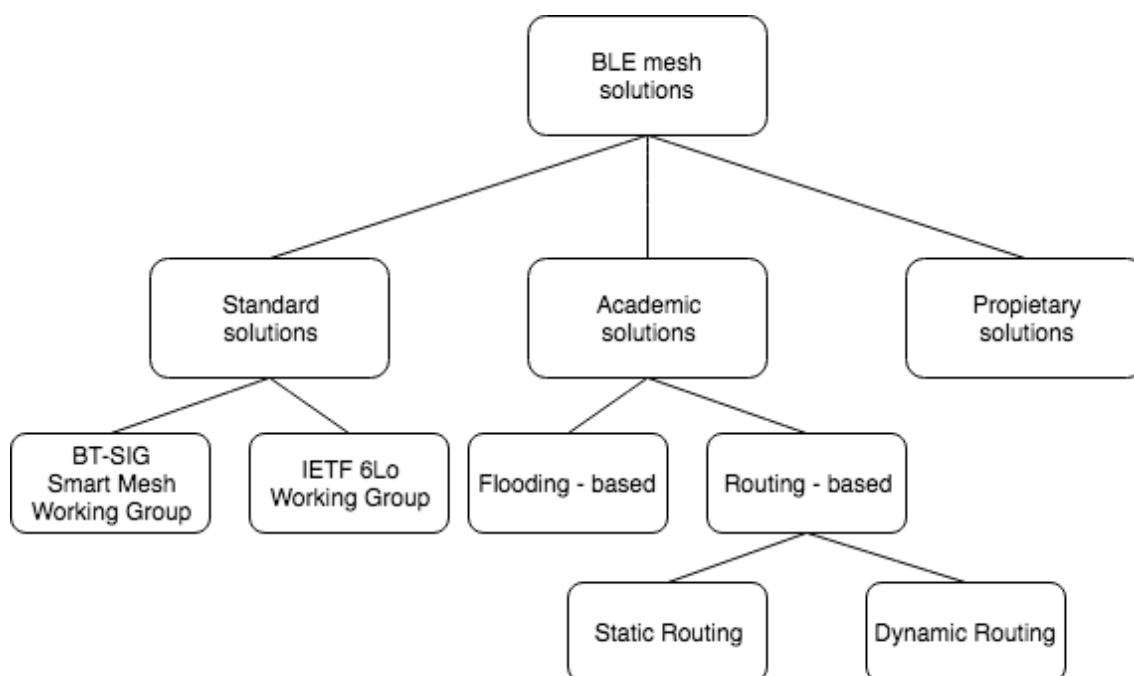


Figura 9 - Soluciones BLE a redes mesh [23]

4.1. Estándares BLE para redes mesh

En este subapartado presentaremos las diferentes normas estandarizadas referentes a BLE para redes mesh. Las dos organizaciones de desarrollo de normas responsables de estos esfuerzos son Bluetooth Special Interest Group (SIG) y el Internet Engineering Task Force (IETF).

4.1.1. Bluetooth SIG: Bluetooth Smart Mesh

La organización Bluetooth SIG anunció en 2015 la creación del grupo de trabajo Bluetooth Smart Mesh, el cual se encargaría de desarrollar una arquitectura que permitiese a BLE soportar la topología mesh. Para así, cumplir con los requisitos de IoT.

El objetivo del grupo de trabajo creado era crear una plataforma común que permitiera operar en distintos casos de uso, como la interconexión de los diferentes sensores que existen en una casa.

4.1.2. IETF: IPv6 over BLE Mesh Networks

El IETF, con el objetivo de adaptarse al mercado de IoT, publicó la RFC7668 en 2015. Esta especificación es relativa al protocolo “IETF: IPv6 over BLE Mesh Networks”. Esta especificación adaptaba la tecnología 6LoWPAN para soportar IPv6 sobre redes BLE, aunque sólo se consideró la topología en estrella.

Esta especificación tiene en cuenta la existencia de un enlace de conexión entre un nodo y sus vecinos, a través del cual se pueden intercambiar paquetes IPv6. Dichas conexiones se establecen por medio del protocolo IPSP.

La capa de adaptación basada en 6LoWPAN desarrollada proporciona compresión de encabezado IPv6 y UDP, lo que mejora la eficiencia de comunicación, y optimiza la detección de vecinos IPv6, que ofrece una configuración de red adecuada para dispositivos restringidos, ambos adaptados para topologías de malla BLE. Se supone que un protocolo de encaminamiento encuentra caminos para la comunicación entre dispositivos finales. El enrutamiento se realiza en la capa IP.

4.2. Soluciones académicas de BLE para redes mesh

En este subapartado presentaremos las diferentes soluciones académicas propuestas referentes a BLE para redes mesh. Se puede realizar una primera clasificación en dos categorías principales: soluciones basadas en difusión (*flooding-based*) y basadas en encaminamiento (*routing-based*).

Las soluciones basadas en difusión (*flooding*) no realizan el encaminamiento, sino que transmiten paquetes a través de la red a través de los canales de publicidad BLE; mientras que las soluciones basadas en encaminamiento (*routing*), utilizan protocolos de encaminamiento para el reenvío de paquetes y transmiten datos a través de los canales de datos BLE.

4.2.1. Flooding-Based Solutions

Se propone utilizar mecanismos basados en Bluetooth 4.0 haciendo uso del algoritmo de Trickle [24]. El algoritmo Trickle permite a nodos en un medio compartido de baja potencia y de bajo consumo intercambiar información de manera robusta, energéticamente eficiente, simple y escalable. Además, estos estudios [23] se basan en que el tráfico se propaga siguiendo una probabilidad, la cual la determina un nodo a la hora de transmitir en función del número de nodos vecinos.

Una de las soluciones más conocidas es BLEmesh. BLEmesh [21] es un protocolo para redes malladas inalámbricas que hace uso de la capacidad de difusión o broadcast de las transmisiones inalámbricas. Mediante la capa Generic Access Profile (GAP), junto con los paquetes de señalización en modo “no-conectable” que envían los dispositivos, es posible identificar tanto la carga de datos disponible para diferentes tamaños de la red mallada (distintos números de nodos) como la cantidad de paquetes que se envían en un lote.

En BLEmesh, los paquetes que transportan datos de un par origen-destino específico se agregan en lotes. Los datos, junto con los campos de control, que se utilizan para decidir qué nodos participarán como emisores, se transportan en la carga de los anuncios.

Diversos estudios demuestran que BLEmesh requiere menos transmisiones que los mecanismos de difusión básicos y que los mecanismos de encaminamiento basados en fuentes unidifusión.

4.2.2. Routing-Based Solutions

Este subapartado abordará las soluciones basadas en encaminamiento, las cuales, a su vez, se pueden subdividir en estáticas y dinámicas.

4.2.2.1. Soluciones basadas en encaminamiento estático

Solución basada en una topología en forma de árbol sobre Bluetooth 4.0. Este esquema incluye tres tipos de nodos: el nodo raíz, que es un dispositivo central como se define en la especificación BLE; los nodos intermedios, que en realidad comprenden dos subnodos (uno que actúa como maestro para nodos ubicados en un nivel jerárquico inferior y el otro actúa como esclavo para nodos de nivel jerárquico superior); y nodos hoja (*leaf*), que están configurados para ser dispositivos periféricos.

Básicamente, el esquema de transmisión se basa en la transmisión de datos desde los nodos a la raíz a un nodo al siguiente en un nivel jerárquico superior, y el proceso se repite hasta que los datos lleguen a la raíz. La raíz también puede enviar datos a otros nodos; en ese caso, la ruta se determina en función del destino y las direcciones de los nodos intermedios.

Esta solución es adecuada para la recopilación de datos de las redes de sensores (WSN), donde el nodo raíz es un nodo receptor. Sin embargo, al tratarse de una solución basada en un árbol, este esquema sufre del problema de fallo único al depender de los nodos raíz y carece de mecanismos para reconstruir la red después de una falla de nodo o enlace.

Otra conocida solución es, presentada anteriormente, RT-BLE. Solución de enrutamiento estático diseñada a través de Bluetooth 4.1 y destinada a habilitar el retardo que presenta BLE en redes. Esto lo logra, haciendo que cada nodo mantenga una ruta predeterminada y una ruta alternativa como una copia de seguridad.

4.2.2.2. Soluciones basadas en encaminamiento dinámico

Distintas soluciones basadas en encaminamiento dinámico, las cuales se diferencian en el mecanismo de encaminamiento usado, el uso o no de los canales de señalización o canales de datos o ambos para encontrar las rutas óptimas. Ejemplos de ellos:

- MultiHop Transfer Service (MHTS) [25]. Publicado en 2013. Fue diseñado a través de Bluetooth 4.0, basado en encaminamiento de siguiente salto, y bajo demanda sobre la capa GATT. MHTS consta de dos fases: la primera maneja descubrimiento vecino, establecimiento de conexión y descubrimiento de ruta. La segunda comprende el almacenamiento y reenvío de datos en el camino de extremo a extremo. La transmisión entre dispositivos finales está limitada por la memoria disponible de los dispositivos BLE.

- BLE Mesh Network (BMN) [26]. Diseñado sobre Bluetooth 4.1. Solución basada en encaminamiento que transmite los mensajes de encaminamiento en los canales de señalización. Consta de tres fases: construcción, mantenimiento y optimización. La primera de ellas, su objetivo es establecer el enlace de conexión entre dos vecinos. La fase de mantenimiento tiene como objetivo mejorar la configuración de los parámetros BMN y reenviar paquetes a sus destinos previstos. Para reenviar un paquete, cada nodo fuente primero busca una ruta hacia el destino en su tabla de enrutamiento. Si no se encuentra una ruta, el nodo envía el paquete a su padre. La fase de optimización tiene el propósito de equilibrar el peso del nodo de modo que todos los nodos de la red tengan una distancia casi igual a la raíz.

BMN envía mensajes de datos a través de canales de datos, mientras que los mensajes de control se envían a través de canales de señalización. Esta solución puede sufrir problemas similares a los de las redes tipo árbol, el único punto de fallo (aunque es mitigada por padres alternativos cuando están disponibles) y presenta congestión en el área cercana al nodo raíz.

4.3. Soluciones patentadas BLE para redes mesh

Este subapartado abordará las soluciones ya patentadas para BLE orientado a redes mesh. Con la creciente demanda y aparición de nuevos casos de uso en el mercado IoT, varias compañías han desarrollado soluciones propietarias para redes de malla BLE. La mayoría de estas soluciones han sido diseñadas para los campos de la domótica y / o iluminación, así como otros casos de uso de IoT.

La más comúnmente conocida es CSRmesh.

4.3.1 CSRmesh

Cambridge Silicon Radio (CSR) desarrolló CSRmesh, un protocolo propietario que opera sobre Bluetooth 4.0 y posterior, que permite reenviar mensajes a través de dispositivos BLE en una red mesh.

CSRmesh utiliza las inundaciones en los canales de señalización para la comunicación de extremo a extremo. En este caso, no se utilizan jerarquías, por lo cual todos los dispositivos tienen el mismo nivel jerárquico. Las inundaciones se controlan utilizando un mecanismo TTL y evitando que un paquete se retransmita en más de una ocasión. Una red CSRmesh puede, en teoría, comprender hasta 64,000 dispositivos. Los mensajes pueden tener como destino un nodo o un grupo de nodos.

4.4. Resumen apartado

En este subapartado, con el objetivo de clarificar y clasificar la información presentada de una forma concisa, presentaremos tablas que clasifiquen las distintas soluciones presentadas y sus características más importantes.

| Nombre | Uso de los canales | Características |
|---|--|--|
| Mecanismos basados en Bluetooth 4.0 con Trickle | <ul style="list-style-type: none"> • Canales de datos: - • Canales de señalización: transportan los datos. | <ul style="list-style-type: none"> • Tráfico se propaga según probabilidades. • Trickle ofrece una robustez y una escalabilidad adicional a la red mesh. |
| BLEmesh | <ul style="list-style-type: none"> • Canales de datos: - • Canales de señalización: transportan los datos. | <ul style="list-style-type: none"> • Transmisión basada en difusión. • Menos transmisiones y retransmisiones necesarias que otras soluciones. |

Tabla 3 - Soluciones basadas en difusión (*flooding-based solutions*)

| Nombre | Encaminamiento | Uso de los canales | Características |
|--|----------------|---|--|
| Solución basada en topología árbol (Bluetooth 4.0) | Estático | <ul style="list-style-type: none"> • Canales de datos: transportan los datos. • Canales de señalización: -. | <ul style="list-style-type: none"> • Topología en árbol. • Transmisión de los nodos raíz a nodos en niveles jerárquicos superiores (proceso repetitivo). • Solución adecuadas para redes de sensores (WSN). |
| RT-BLE | Estático | <ul style="list-style-type: none"> • Canales de datos: transportan los datos. • Canales de señalización: -. | <ul style="list-style-type: none"> • Basado en Bluetooth 4.1. • Elimina los retardos de ms existentes en redes BLE. • Rutas predeterminadas. |
| MultiHop Transfer Service (MHTS) | Dinámico | <ul style="list-style-type: none"> • Canales de datos: transportan los datos e información de encaminamiento. • Canales de señalización: transportan información de encaminamiento. | <ul style="list-style-type: none"> • Basado en Bluetooth 4.0. • Encaminamiento siguiente salto y bajo demanda. • Limitación en la transmisión por memoria del dispositivo. |
| BLE Mesh Network (BMN) | Dinámico | <ul style="list-style-type: none"> • Canales de datos: transportan los datos. • Canales de señalización: transportan información de encaminamiento. | <ul style="list-style-type: none"> • Basado en Bluetooth 4.1. • Transmite mensajes de encaminamiento por señalización. • Único punto de fallo y congestión en nodo raíz. |

Tabla 4 - Soluciones basadas en encaminamiento (*routing-based solutions*)

| Nombre | Tipo de solución | Uso de los canales | Características |
|---------|-----------------------------|--|---|
| CSRmesh | Solución basada en difusión | <ul style="list-style-type: none"> • Canales de datos: -. • Canales de señalización: permiten la comunicación extremo a extremo. | <ul style="list-style-type: none"> • Basada en Bluetooth 4.0. • Usa mecanismos controlados de difusión en los canales de señalización. • Hasta 64.000 nodos. • Mensaje a uno o varios destinatarios. • Ideal para Smart Homes y/o edificios inteligentes |

Tabla 5 - Soluciones patentadas BLE para redes mesh

5. Evaluación de BLE mesh

En este apartado se realizará una evaluación de la tecnología Bluetooth Low Energy aplicado para redes mesh en un caso de uso concreto: entornos indoor. Se comentará en el subapartado correspondiente el por qué se descartan los entornos exteriores (o outdoor).

Además, en esta evaluación se comentarán las limitaciones que presenta actualmente la tecnología y las distintas soluciones comerciales o aún en fase de diseño que existen para solventarlas o reducir su impacto.

Una vez presentadas estas limitaciones se realizará una evaluación del rendimiento que presenta BLE en este tipo de entornos interiores y se comparará con dos de las tecnologías más altamente utilizadas en este tipo de aplicaciones: Zigbee y Thread.

Por último, se realzarán los pros y contras de la tecnología, indicando a su vez los casos de uso en los que puede ser utilizada.

5.1. Limitaciones de BLE mesh

El protocolo Bluetooth Low Energy aplicado a redes mesh presenta, como cualquier tecnología, varias limitaciones, las cuales se expondrán a continuación, proporcionando, en la mayoría de los casos, como las distintas empresas que hacen uso de esta tecnología intentan reducir el impacto de las mismas.

1. Una de las primeras y de las más intuitivas limitaciones de BLE mesh es que no todos los dispositivos Bluetooth existentes hoy en día en el mercado van a disponer de estas nuevas características. Esto es debido a que para que un dispositivo sea compatible con BLE mesh se requiere que el dispositivo ya sea compatible con Bluetooth 4.0 o 5.0, lo que significaría que no haría falta nuevo hardware, por lo que muchos dispositivos pueden obtener soporte. Pero, añadiendo la dependencia de que sus fabricantes lancen una actualización.

Dicho esto, una solución a los dispositivos que no obtengan esta actualización es propuesta por Bluetooth SIG. Esta solución radica en permitir que dispositivos ya desplegados que conformen la malla BLE actúen como "proxies", que permiten a otros productos Bluetooth conectarse y controlar dispositivos en la red. De esa forma, un smartphone, por ejemplo, podría conectarse a un proxy de la red mesh del hogar del individuo y permitir el control remoto de los sensores de luz para apagar y encender luces.

2. Otra limitación de BLE mesh es la velocidad máxima que puede alcanzar. Como se ha comentado en apartados anteriores, BLE mesh es más adecuado para transmitir pequeñas cantidades de datos a una tasa de 1 Mbps, como lecturas de sensor de temperatura, coordenadas de GPS, etc. BLE es aproximadamente 2-3 veces más lento que Bluetooth Classic y 20-30

veces más lento que Wi-Fi. Sin embargo, BLE no es adecuado para enviar datos en tiempo real a un servidor. Si se requieren datos en tiempo real, se debe usar una puerta de enlace especial para enviar los datos.

Diversos estudios han propuesto protocolos que solucionan esta limitación. Uno de ellos es RT-BLE, este protocolo permite a BLE acotar el retraso de sus mensajes, proporcionando así soporte para comunicaciones en tiempo real, y también introduce transmisiones de datos de varios saltos, permitiendo así la creación de redes en malla. La idea principal para lograr este resultado es crear múltiples redes (aquí llamadas subredes), cada una coordinada por un maestro. Las subredes a su vez comparten uno o varios esclavos que actúan como "puentes" entre las subredes.

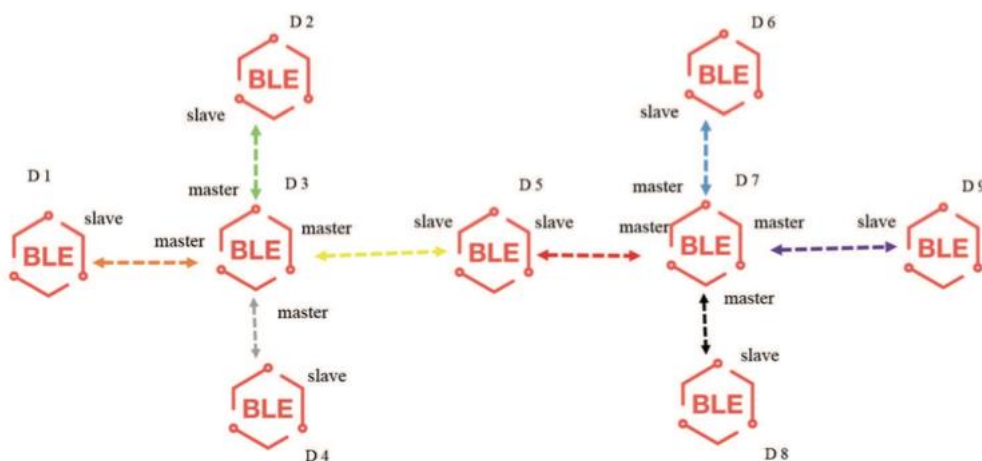


Figura 10 – RT-BLE ejemplo de subredes [16]

De todos modos, con la existencia de otros estándares Wi-Fi como 802.11ac o 802.11ah que pueden transmitir a velocidades de hasta 1.3 Gbps, lo que los hace ideales para archivos y datos más grandes en menor tiempo.

3. La seguridad es, actualmente, un desafío en las redes BLE mesh. La seguridad, como es sabido, es de suma importancia en las redes IoT, debido al impacto que tales redes puede tener en las actividades físicas del mundo.

El problema en la seguridad surge porque, actualmente, sólo se encriptan los paquetes transmitidos por los canales de datos, no por los canales de señalización, y, además la autenticación sólo se realiza en la conexión. Esto hace que los paquetes de encaminamiento y los de datos que se transmiten a través de canales de señalización no están encriptados a menos que la capa de aplicación proporcione una solución de seguridad.

Por otro lado, dado que BLE se diseñó originalmente para redes de topología en estrella, los canales de datos están protegidos por seguridad por salto. El

cifrado y la autenticación de extremo a extremo no son actualmente compatibles con las redes de malla BLE.

Se han propuesto y estudiado diversas formas y/o mecanismos para eliminar o reducir el impacto de esta limitación actual existente en la seguridad. Una de ellas es aprovechar la seguridad extremo a extremo de los protocolos basados en IP en las redes BLE basadas en IPv6 (hacer uso de TLS en HTTP). En cambio, las redes de malla BLE no basadas en IP necesitarán desarrollar una funcionalidad de seguridad de extremo a extremo que pueda ser equivalente a la solución planteada.

4. Problemas de privacidad. Los dispositivos BLE, en un entorno local como una casa o una oficina pueden tener direcciones IP privadas, que se actualizan con frecuencia, para contrarrestar amenazas tales como la correlación de actividades a lo largo del tiempo o el seguimiento de la ubicación. Sin embargo, este enfoque puede tener un impacto negativo en un mecanismo de enrutamiento. Dado que las direcciones privadas BLE a menudo se cambian, las tablas de enrutamiento también deben actualizarse con frecuencia, lo que puede conducir a una sobrecarga de mensajes de protocolo de enrutamiento. Habrá una sobrecarga de mensaje de protocolo de enrutamiento adicional siempre que la frecuencia de las actualizaciones de direcciones supere la tasa prevista de mensajes de protocolo de enrutamiento.

Una posible solución futura para evitar este problema y solventar esta limitación podría ser un esquema coordinado, en toda la red. De este modo, los nodos sólo compartirían información que permitiese determinar la dirección en uso para cada nodo en un momento dado.

5. Existen algunas limitaciones en lo relacionado a la interoperabilidad de las soluciones académicas o patentadas propuestas en el apartado anterior. Debido a que las soluciones académicas lo que buscan es demostrar la viabilidad de un paradigma, mientras que, las patentadas, el objetivo es ofrecer un nuevo producto comercial independiente del resto. Sin embargo, la interoperabilidad es crucial para permitir que los productos de diferentes fabricantes se comuniquen entre sí, y se requiere estandarización para habilitar este paradigma.

La solución a esta limitación es ceñirse a las dos organizaciones de estandarización existentes: el IETF y Bluetooth SIG's Bluetooth Smart Mesh. Además, es razonable considerar que la presencia en el mercado de tecnología basada en IP para dispositivos restringidos seguirá aumentando, ya que esto facilita la interoperabilidad, la escalabilidad y el desarrollo de aplicaciones.

5.2. Previo a la evaluación: selección de caso de uso y métricas

Para evaluar las prestaciones que ofrece BLE mesh en comparación con otras tecnologías utilizadas en IoT, este estudio se centrará en un caso de uso concreto: los entornos interiores (indoor), como las Smart Homes o casas inteligentes o los edificios inteligentes.

Este tipo de entornos interiores está típicamente dominado por las tecnologías de redes de área local (LPLAN) de baja potencia que se enfocan en la automatización del hogar, tales como ZigBee, Thread o BLE. Los casos de uso que van más allá de la domótica incluyen la automatización empresarial / industria.

Los entornos exteriores (outdoors) están dominados por los nuevos participantes que están llegando a través de tecnologías de redes de área extensa de baja potencia y gran alcance (LPWAN), que desafían la necesidad de alimentación de red en casos de uso de IoT al aire libre y de largo alcance. LoRa y SigFox en bandas sin licencia, y NB-IoT, LTE Cat-M y otros esfuerzos basados en LTE en bandas con licencia son las más conocidas y utilizadas.

Por tanto, se opta por realizar la evaluación con este caso de uso debido a las limitaciones que presenta Bluetooth con respecto a su alcance (50-150 metros), lo cual, en otras soluciones como Sigfox, no existen, al ser expresamente dedicadas para entornos exteriores y/o de difícil acceso, como entornos rurales.

Además, BLE ofrece unas velocidades de transmisión (1Mbps) que lo hacen ideal para este tipo de entornos indoors, en los que, típicamente, el despliegue será una red de sensores que trate de automatizar la domótica del hogar; maximizando la vida útil de los dispositivos al proporcionar una duración de la batería de hasta 2 años.

Es por ello, por lo que el caso de uso que se plantea es el de una casa inteligente en el que se quiere utilizar sistema domótico, basado en sensores, para controlar diferentes configuraciones como el nivel de luz o la temperatura ambiente. En este escenario planteado, además se nos permite evaluar el rendimiento de BLEmesh cuando trabaja en un entorno en el que existen otras tecnologías inalámbricas, como por ejemplo WiFi, trabajando en el mismo rango de frecuencias (2.4GHz).

Una vez focalizado el estudio en entornos interiores (indoor). Este estudio, por tanto, proporcionará resultados de cómo afectan las interferencias de otras tecnologías que actúan en el mismo rango de frecuencias (2.4GHz), tal y como es WiFi; la latencia en función del número de saltos, seguridad, costes de despliegue, etc.

5.3. Evaluación de BLEmesh: entorno indoor

Para evaluar las prestaciones que ofrece BLE mesh, este estudio se centrará en un caso de uso concreto: los entornos interiores (indoor), como las Smart Homes o casas inteligentes o los edificios inteligentes en los que, por ejemplo, se quiere utilizar sistema domótico, basado en sensores, para controlar diferentes configuraciones como el nivel de luz o la temperatura ambiente del edificio.

A la hora de realizar o medir el rendimiento de cualquier tecnología se hace imprescindible tener en cuenta la posible existencia de otro tráfico de red, ya que puede haber muchas subredes que interfieren entre sí (y más dentro de una casa o un edificio comercial); la existencia de interferencia WiFi de la infraestructura WiFi existente en el edificio en cuestión (debido a que trabajan en la misma banda 2.4GHz); y, además, la velocidad y la latencia de la red, así como la gran latencia y fiabilidad que presenta el tráfico multicast, que es un tipo de tráfico comúnmente usado para los controles de iluminación en entornos densos de oficina o la domótica de las casas inteligentes.

Por tanto, se parte de condiciones de que existen otros dispositivos WiFi trabajando en la misma red y creando interferencias sobre los dispositivos que conforman la malla BLE.

Para abordar esta evaluación del rendimiento de BLEmesh en entornos indoor, la cual está basada en el análisis de diversas fuentes externas, dividiremos este apartado en subapartados en función de las métricas a evaluar.

Como la mayor parte de la evaluación se basa en la latencia, hay que considerar cómo afecta la latencia según el tipo de aplicación, debido que si se tiene aplicaciones sensibles a la latencia esta puede afectar al rendimiento de las mismas.

| Tipo de aplicación | Latencia |
|---|-----------------|
| Navegación web | 100-800ms |
| Juegos online no en tiempo real (Facebook) | 200-1000ms |
| Juegos en tiempo real | 10-150ms |
| Streaming en tiempo real | 50-150ms |
| Operaciones de bolsa | 5-100ms |

Tabla 6 - Latencia según tipo de aplicación [30].

5.3.1. Latencia frente a número de saltos

Un importante parámetro a evaluar es la latencia, que es la suma de todos los retardos temporales que se producen en una comunicación. Este parámetro, si obtiene un valor alto, puede tener connotaciones negativas en la red debido a que la haría no útil para ciertos tipos de tráfico (como el tráfico en tiempo real) al crear grandes retardos.

Para evaluar esta métrica se tendrán en cuenta la latencia existente cuando se fragmenta un paquete en comparación a cuando no existe la fragmentación en la capa de transporte. Cabe recordar que, con BLE mesh, en la capa de transporte, solo podemos enviar paquetes no segmentados de 11 bytes o una carga útil más pequeña. Resultados superiores a 11 los bytes usan mensajes segmentados.

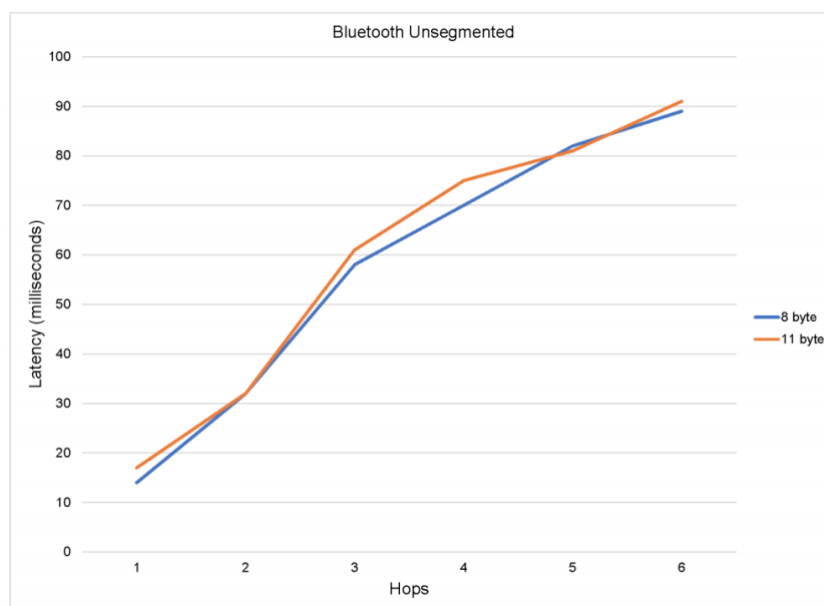


Figura 11 - Latencia en función del número de saltos paquetes no fragmentados [28]

Como se puede observar en la gráfica anterior, para en el caso en el que el paquete a transmitir no excede los 11 bytes (máxima longitud a transmitir sin fragmentar), la latencia experimenta un crecimiento conforme aumenta el número de saltos de la red para llegar al destino, llegando a experimentar para el caso de 5-6 saltos unos 80 y 90 ms de latencia, lo cual para un entorno de IoT, en el que se quiere obtener información no en tiempo real de ciertas mediciones está bien, pero corrobora lo indicado en apartados anteriores que lo hace inviable para aplicaciones en tiempo real.

Cabe destacar, que en un entorno típico de una red de sensores de una casa, el número de nodos puede ser de unos 20 (dependiendo del tamaño de la casa y aprovechando el alcance de BLE, 50m y su capacidad multisalto), por lo que, dependiendo de donde se encuentre el nodo controlador o desde donde se mande la petición, por ejemplo, de encender las luces o consultar la temperatura,

el número medio de saltos podría ser el expuesto en la gráfica anterior unos 4-6 saltos de media.

Si ahora pasamos a comparar el caso se produzca fragmentación en los paquetes debido a que exceden el límite de carga útil expuesto por la capa de transporte.

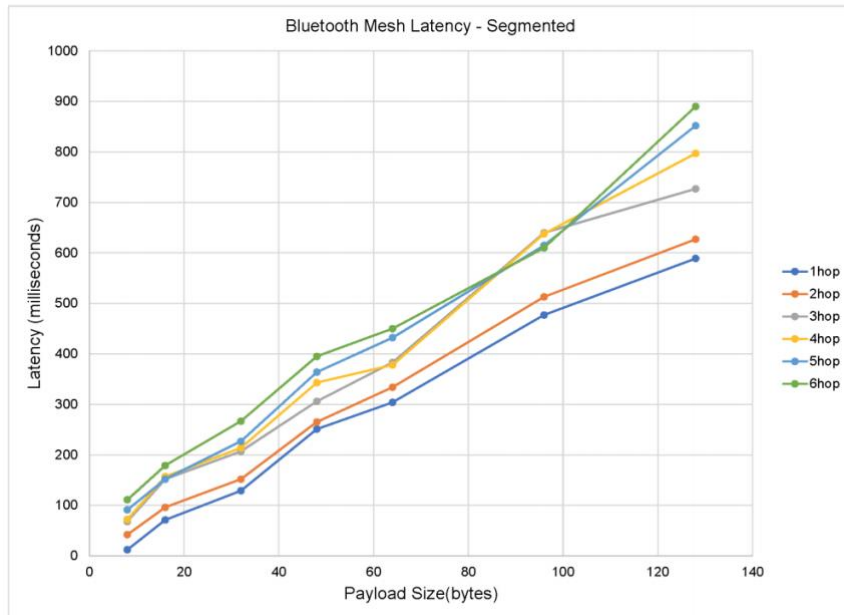


Figura 12 - Latencia en función del número de saltos con fragmentación [28]

Como se puede observar en la gráfica anterior, se parte de una carga útil superior a 11 bytes, y se van comparando para el caso de un número determinado de saltos, cómo afecta el incremento de la carga útil a transmitir a la latencia. Podemos comentar, ciertos resultados, como por ejemplo, que para el caso de mensajes que requieran poca fragmentación (en torno a los 20 bytes), la latencia hasta 5 saltos no supera los 100ms. Pero, como se puede observar, existe un crecimiento casi lineal de conforme aumentan los números de saltos y la carga útil a transmitir, la latencia crece hasta alcanzar los 600ms en caso de un salto, hasta los 900ms en caso de 6 saltos.

Tras presentar estos resultados, no asombran, debido a que Bluetooth Low Energy aplicado para redes mesh, es un protocolo diseñado para entornos IoT, que son, como se ha comentado en innumerables ocasiones, entornos en los que se transmiten paquetes de pequeño tamaño y no se necesita recopilar dicha información en tiempo real si no que, por ejemplo, en este tipo de entornos se realizará 2 o 3 veces al día. Por lo que, tras ver y analizar los resultados, sigue siendo ideal.

5.3.2. Latencia frente a número de nodos

Debido a que Bluetooth Low Energy es una malla que utiliza mecanismos basados en difusión (flooding), existe preocupación sobre la relación existente entre latencia y la escalabilidad a medida que aumenta el tamaño de la red.

Como nuestro caso de uso bajo estudio es una red pequeña de un hogar (unos 20-25 nodos), a continuación se representa la latencia para este tamaño de red con varias cargas útiles de paquetes. A modo informativo, se presentará además la latencia experimentada para una gran red formada por 192 nodos (caso de un edificio inteligente, por ejemplo).

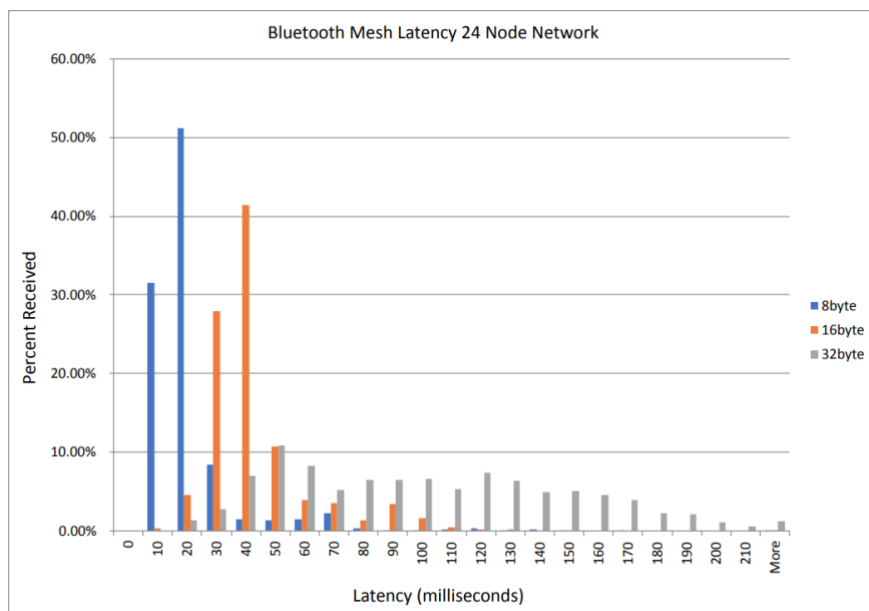


Figura 13 - Latencia en función del tamaño de la red (red pequeña) [28]

Esta gráfica muestra, para una determinada carga útil a transmitir (8, 16 o 32 bytes), teniendo en cuenta que para 16 y 32 bytes se produce fragmentación, qué porcentaje de paquetes se reciben a una latencia.

Esta gráfica, además, revela algunos datos interesantes, como que a medida que aumenta la carga útil del paquete a transmitir, el porcentaje de paquetes que se reciben a grandes latencias (120-170ms) es mayor. En cambio, cuando no se produce fragmentación de paquetes (8bytes), un gran porcentaje de paquetes (casi el 90%), se recibe con una latencia inferior a 30ms.

A modo informativo, aunque exceda el caso de uso presentado, para evaluar la escalabilidad se presenta la latencia obtenida en una red de 192 nodos.

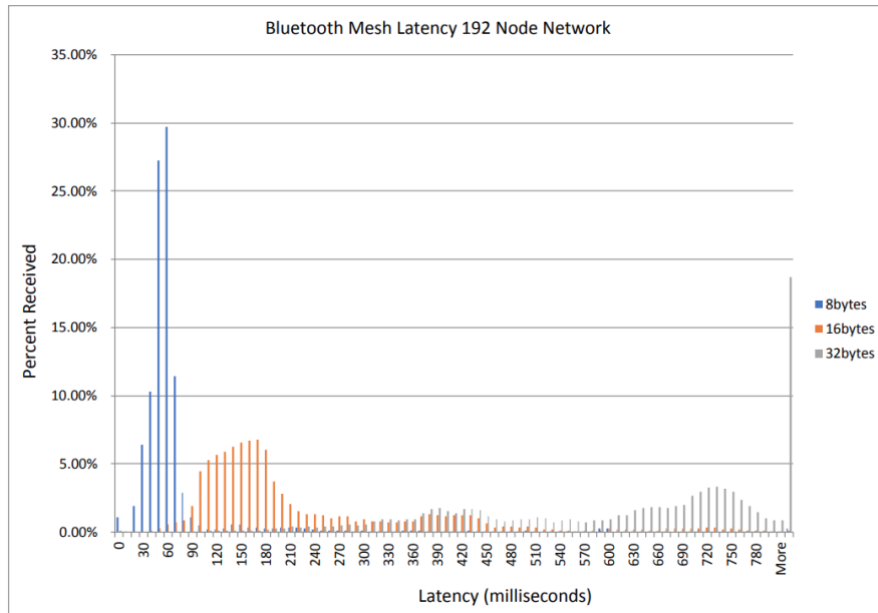


Figura 14 - Latencia en función del tamaño de la red (red grande) [28]

Ahora, se puede observar que la fragmentación tiene una connotación negativa en la red, debido a que los casos de 16 y 32 bytes, el porcentaje de paquetes que se reciben con una latencia grande (mayor de 300 ms) es mayor en comparación con las transmisiones que no requieren de fragmentación (las de 8 bytes), que siguen estando en un alto porcentaje de baja latencia.

Unas conclusiones que se pueden sacar al evaluar esta métrica son:

- A medida que aumenta el tamaño de la red, la latencia promedio aumenta incluso para el paquete de 8 bytes (que no requiere fragmentación). Para el paquete de 8 bytes, la latencia es generalmente baja incluso a través de redes de grandes números de nodos.
- A medida que aumenta el tamaño de la red, la latencia aumenta y se extiende. Aumentamos la escala de latencia a medida que aumentaba el tamaño de la red para mostrar mejor los datos.

5.3.3. Comportamiento frente a interferencias

En el caso de uso propuesto, hay un alto porcentaje de existencia de coexistencia de redes WiFi o Zigbee con la red BLE mesh a evaluar, es por ello que se hace necesario evaluar la interferencia de las tecnologías inalámbricas en dispositivos habilitados para BLE en este entorno.

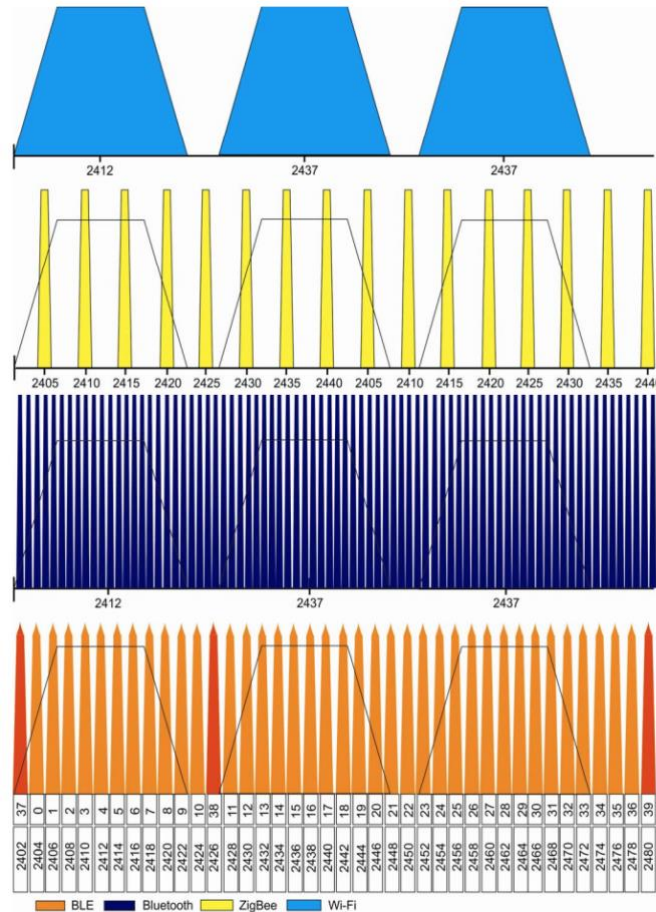


Figura 15 - Espectro de frecuencias de BLE, Bluetooth, Zigbee y WiFi [29].

Como se puede observar las tecnologías que pueden coexistir en el hogar trabajan en la misma banda de frecuencias (2.4GHz) y, por tanto, la ubicación de los nodos Wi-Fi y ZigBee también debe gestionarse adecuadamente para aumentar el alcance de BLE. Si analizamos caso por caso:

- Interferencias con WiFi. Debido a este funcionamiento en la misma banda, el potencial para la interferencia existe. Diversos estudios [29], que analizan si hay interferencia Wi-Fi en las transmisiones BLE, presentan resultados que no muestran ningún efecto en la tasa de error de bit o la lectura de RSSI, de hecho la lectura de RSSI muestra que el valor aumenta.

Además, los resultados obtenidos muestran que los saltos en frecuencia que realiza Bluetooth son realmente efectivos para evitar trabajar en los mismos canales que Wi-Fi, por lo tanto, es muy buena coexistencia entre BLE y Wi-Fi.

- Interferencias con Zigbee. Zigbee y BLE comparten la misma banda, y por lo que puede dar lugar a interferencias y a colisiones con sus correspondientes pérdidas de paquetes.
- Interferencias con Bluetooth Classic. Bluetooth Classic y BLE comparten la misma banda, y aunque la tecnología Bluetooth comparte un esquema de salto similar para evitar bandas ocupadas como BLE, todavía hay un potencial de existencia colisiones e interferencias entre estas tecnologías.

5.4. Evaluación de BLEmesh: comparativa otras tecnologías

Para evaluar las prestaciones que ofrece BLE mesh en comparación con otras tecnologías utilizadas en IoT, este estudio se centrará en un caso de uso concreto: los entornos interiores (indoor). Por tanto, las tecnologías en las que nos centraremos serán que puedan utilizarse en este tipo de entornos y tengan características similares.

Las más adecuadas para este tipo de entornos son BLEmesh, Zigbee, la emergente Thread y WiFi 802.11ah. La comparativa, por tanto, se realizará entre BLEmesh, Zigbee y Thread al ser las más parecidas en cuanto a tipo de red (mallada), tipo de tráfico y tasa de transmisión utilizadas y escalabilidad. WiFi se descarta debido a que, aunque ha proporcionado muchas mejoras para ser adecuada para entornos IoT, presenta un escenario más centralizado debido a que todos los nodos deben estar conectados a un mismo AP y las velocidades que presenta no son comparables, al ser más altas, que las ofrecidas por las otras tecnologías.

Para abordar esta comparativa, se utilizaran las mismas métricas utilizadas en el apartado anterior.

5.4.1. Latencia frente a número de saltos

Al igual que en el subapartado correspondiente a cuando se realizó la evaluación del rendimiento de BLEmesh en entornos indoor, se volverá a utilizar la métrica de la latencia (suma de todos los retardos temporales que se producen en una comunicación).

Para evaluar esta métrica, sólo para el caso de BLEmesh, cuya capa de transporte fragmenta los paquetes con carga útil superior a 11 bytes, se tendrán en cuenta la latencia existente cuando se fragmenta un paquete en comparación a cuando no existe la fragmentación, mientras que para el caso de Thread o Zigbee se tendrá en cuenta la máxima carga útil que pueden transmitir en un paquete.

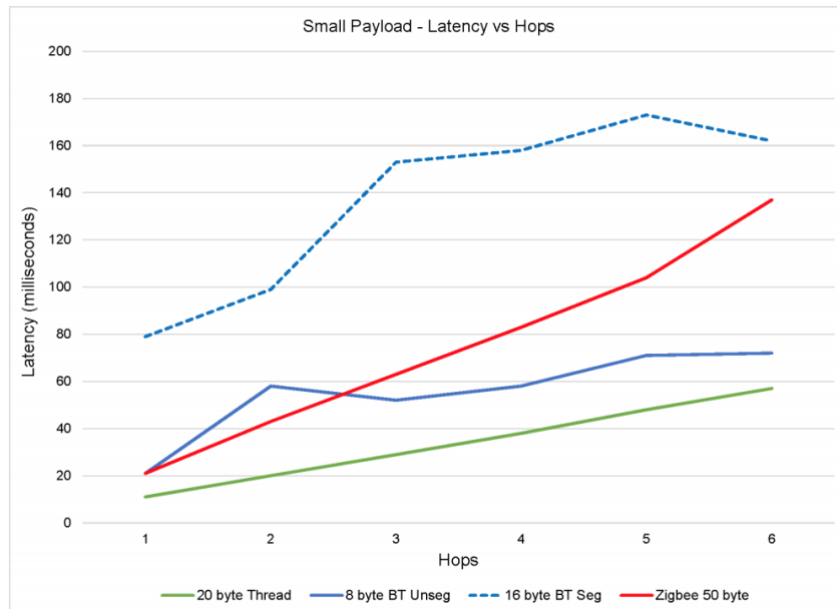


Figura 16 – Comparativa latencia en función del número de saltos[28]

Como se puede observar en la gráfica anterior, Thread presenta un comportamiento lineal con respecto al crecimiento de la latencia con el número de saltos para llegar al destino, llegando a 60ms para 6 saltos, lo que lo hace ideal para cualquier tipo de tráfico. Por otro lado, Zigbee, aún transportando una carga útil superior a la de Bluetooth (50 bytes), consigue un valor menor de latencia en el peor de los casos (140ms) que Bluetooth cuando se produce fragmentación, el cual alcanza casi los 160ms.

Esto lleva a una primera conclusión de que el protocolo que se postula óptimo con respecto al número de saltos es Thread, debido a que su latencia presenta un crecimiento lineal con respecto al número de saltos, manteniéndose siempre por debajo de los 60 ms, sólo BLE cuando no segmenta los mensajes presenta un comportamiento parecido. Pero, Thread además, permite transportar una carga útil superior (20 bytes frente a los 8 bytes de BLE).

La siguiente gráfica representa perfectamente la conclusión llegada en el párrafo anterior, debido a que representa cómo aumenta la latencia con respecto a la carga útil del mensaje, en bytes, para una transmisión de 4 saltos.

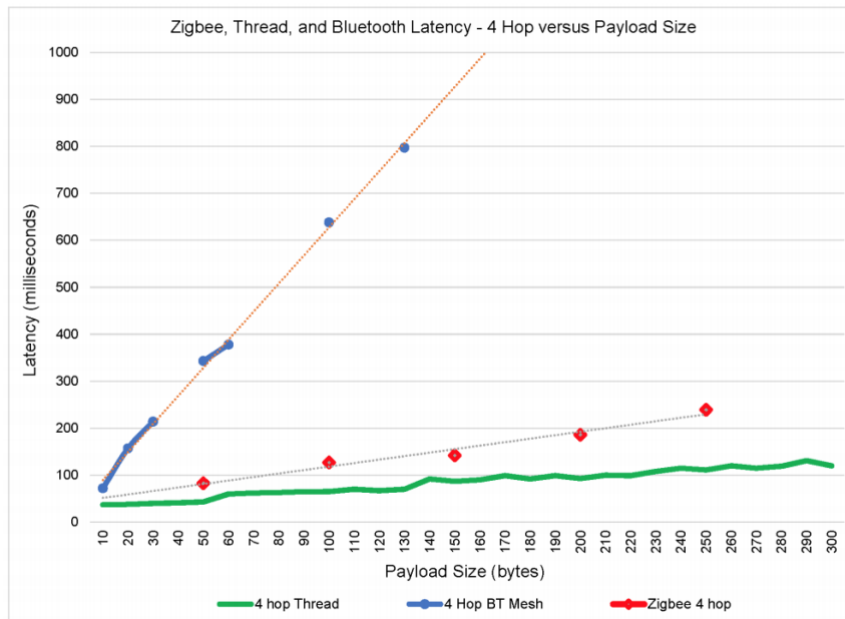


Figura 17 - Comparativa latencia en función de la carga útil para 4 saltos[28]

Se puede observar cómo todas las tecnologías bajo comparativa aumentan la latencia a medida que aumenta la carga útil de la aplicación. Se puede observar, además, la gran dependencia existente con el método de fragmentación y con la congestión en la red cuando se envían los datos. También, se puede observar que BLEmesh debe enviar muchos más paquetes a medida que aumenta el tamaño de la carga, por lo que esta segmentación agrega más latencia a la comunicación. De lo comentado anteriormente, se traduce que existe un gran impacto en la segmentación en la latencia debido a que cuanto más segmentación se produce, mayor será la latencia.

5.4.2. Latencia frente a número de nodos

La malla de inundación BLE mesh se comporta de la misma manera que Zigbee y Thread porque todos los dispositivos generalmente inundan la red para alcanzar el destino, es por ello que se seleccionaron también estas tecnologías.

Como en el caso anterior y, debido al caso de uso que nos pertenece, una red pequeña de un hogar (unos 20-25 nodos), a continuación se representa la latencia para este tamaño de red con varias cargas útiles de paquetes.

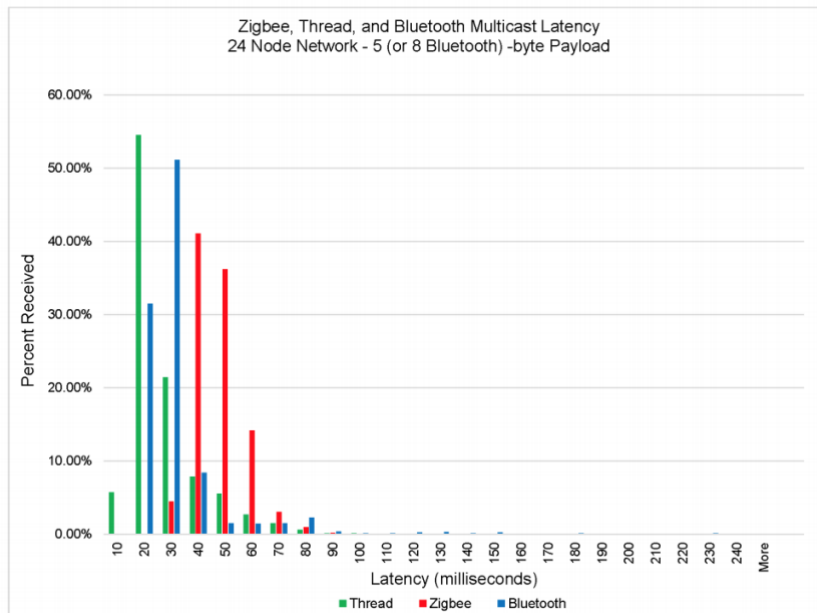


Figura 18 - Latencia en función del tamaño de la red (red pequeña) [28]

Para cada una de estas redes, se observa que las pruebas realizadas son en una red pequeña y con pequeños tamaños de carga. Como se muestra en la gráfica anterior, las tres redes de malla proporcionan un rendimiento muy bueno con una latencia muy por debajo de 200 milisegundos para esta carga útil. Pero, a medida que aumenta el tamaño del paquete, empezamos a ver algunas diferencias en la latencia.

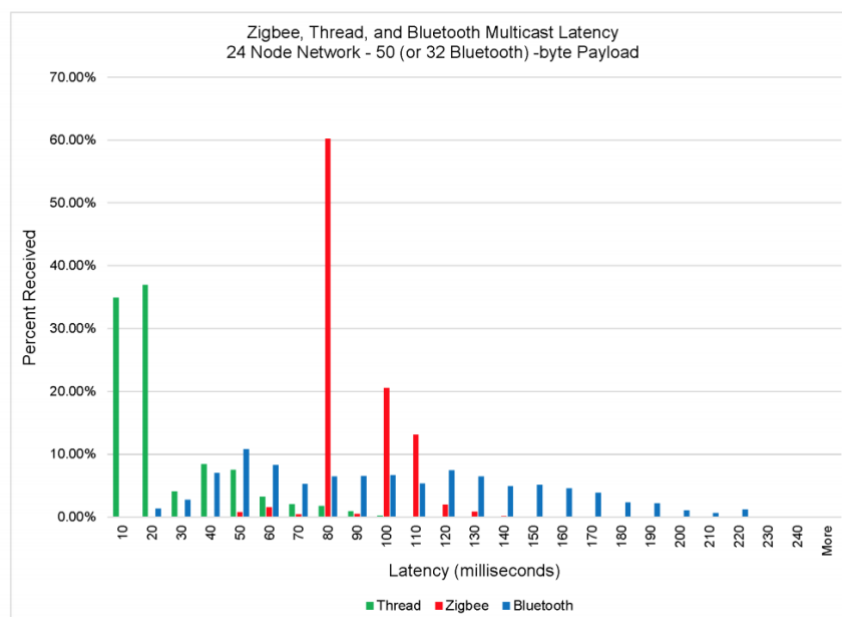


Figura 19 – Comparativa latencia en función del tamaño de la red (red pequeña) [28]

En la gráfica anterior se puede observar como en Thread la latencia aumenta ligeramente; en Zigbee, aumenta y se expande; y Bluetooth Mesh, la latencia se distribuye desde 20 milisegundos hasta 220 milisegundos.

Todo esto hace que, una vez más Thread sea la tecnología ideal para este tipo de entornos, debido a que su latencia es resistente al número de saltos, en comparación a Zigbee y BLEmesh y, además, presenta latencias inferiores que las demás en una red propia del caso de uso que presentamos.

A modo informativo, tal y como hicimos en el apartado correspondiente de la evaluación del rendimiento de BLEmesh, se presentará el caso de uso de una red grande de 192 nodos, para evaluar la latencia de las tecnologías en este entorno.

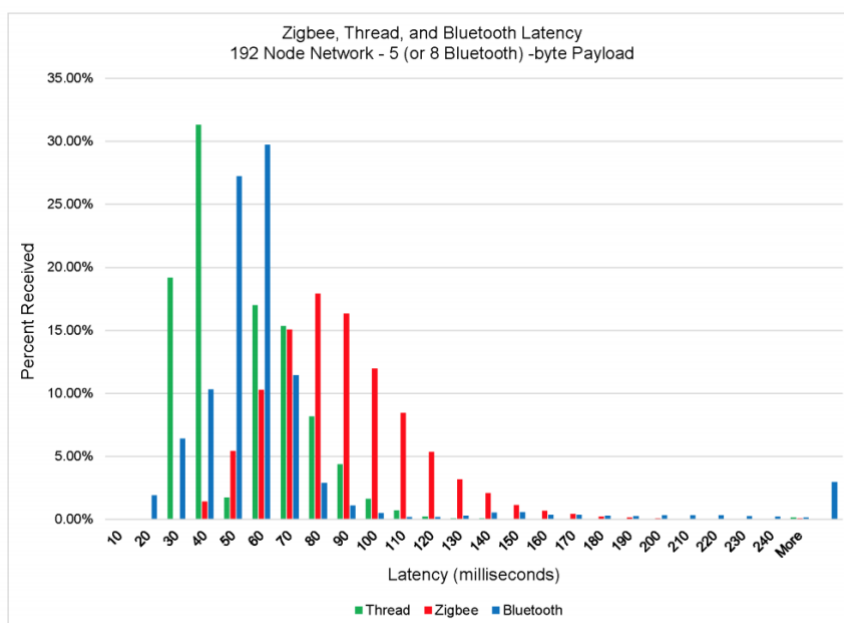


Figura 20 - Comparativa latencia en función del tamaño de la red (red grande) [28]

Se puede observar, tal y como era de esperar, que a medida que la red crece, la latencia aumenta debido a una mayor congestión y un mayor número de saltos en la red. La gráfica anterior muestra que, para paquete pequeños, las tres redes se comportan razonablemente con un aumento y propagación de la latencia a latencias ligeramente más largas. El único punto a destacar es el aproximadamente 3% de los paquetes BLEmesh que terminan con una latencia mayor a 250 milisegundos, lo que lo hace que sufra ciertos problemas de escalabilidad.

5.4.3. Velocidad de transmisión frente a número de saltos

Aunque la velocidad de transmisión no es un requisito altamente imprescindible en entornos IoT, debido a que son entornos de baja tasa de transmisión (unos 100-200Kbit/s), se pretende evaluar como el impacto del número de saltos que un paquete tiene que superar en una red de sensores para alcanzar su destino afecta a la velocidad de transmisión.

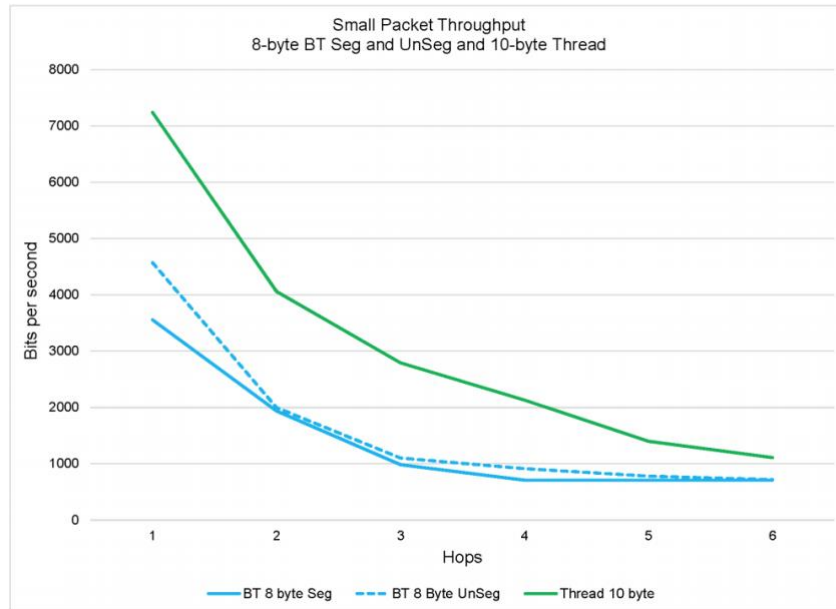


Figura 21 - Comparativa velocidad de transmisión en función del número de saltos (pequeños paquetes) [28]

Se puede observar que, para tamaños de carga pequeños, la velocidad de transmisión, en bits por segundo, es menor a medida que se producen más saltos dentro de la red (una mayor sobrecarga) para alcanzar el destino final.

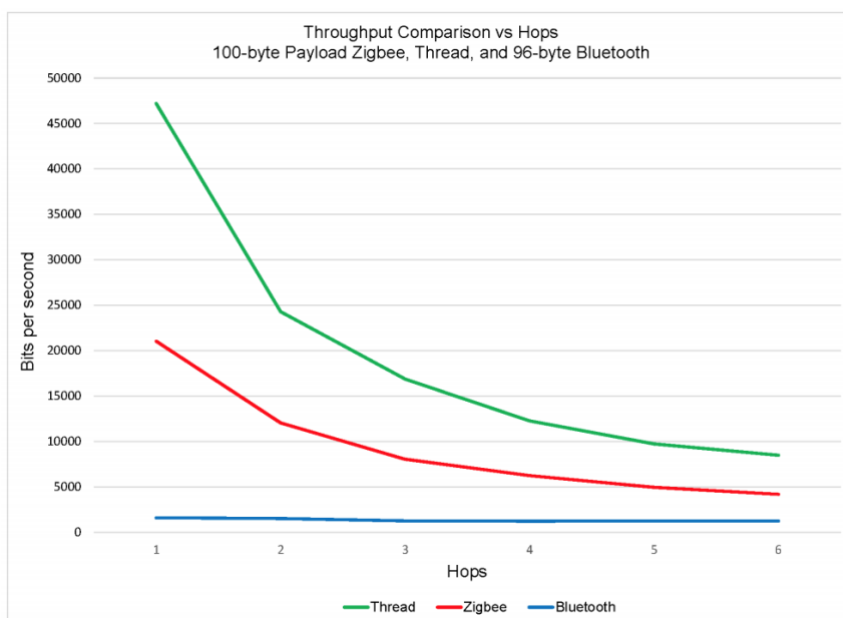


Figura 22 - Comparativa velocidad de transmisión en función del número de saltos (paquetes gran tamaño)[28]

Se puede observar, además, que para tamaños de carga más grandes, la velocidad de transmisión se incrementa en general para Zigbee y Thread; sin embargo, no para BLEmesh. Por tanto, se puede concluir que Thread es la tecnología que presenta una velocidad de transmisión más estable tanto para paquetes pequeños como grandes en comparación con Zigbee y BLEmesh, esta última, además presenta la tasa menor de todas y constante en función del número de saltos, 1Mbps aproximadamente.

5.4.3. Conclusiones de la evaluación

Si se realiza una comparativa desde el punto de vista del rendimiento presentado, se puede observar que, para un entorno indoor con baja carga de datos como una Smart Home, tanto BLEmesh como Zigbee y Thread presentan comportamientos similares.

Sin embargo, cuando los requisitos de la red se vuelven más estrictos, con mayores tamaños de carga de datos, mayores velocidades de transmisión o mayor número de nodos, Thread y Zigbee presentan mejores resultados que BLEmesh, dado que son capaces de transportar mayores cargas, manteniendo latencias más bajas.

Además, si se hace alusión a los costes, cabe destacar que las tres tecnologías presentan unos costes por dispositivos muy similares (de unos pocos de euros), encontrando la principal diferencia en la interoperabilidad. Bluetooth resulta la tecnología más interoperable, dado que se encuentra disponible en la mayoría de los dispositivos actuales (móviles, coches, tablets, smartphones, etc.). Para poder usar Zigbee o Thread es necesario adquirir un chip o una antena dedicada para que opere, que no se encuentra disponible en casi ningún dispositivo.

Como conclusión a la comparativa de BLEmesh con otras tecnologías para un caso de uso específico, en este caso una Smart Home (una red pequeña de unos 20-25 nodos), cabe destacar que BLEmesh se postula como una buena alternativa para este tipo de redes dada su interoperabilidad, ya que no es necesario adquirir nuevos sensores o chips, lo que hace que se reduzcan los costes de despliegue, aunque el coste de los nodos Zigbee, Thread y BLE son muy reducidos (de unos 2-5€ por chip). Como se ha podido observar, BLE presenta ciertas limitaciones a mejorar en lo relativo a las latencias y escalabilidad.

Hay que tener en cuenta, además, que es una tecnología nueva y tiene que madurar y adaptarse al entorno creciente de IoT donde cada vez habrá más y más dispositivos conectados y transmitiendo pequeñas cantidades de información de manera o no periódica. Con todo y con eso, es una tecnología que presenta un potencial asombroso y que en unos años puede ser, junto con Zigbee, la tecnología IoT para entornos indoor más utilizada.

6. Conclusiones

5.1. Conclusiones y líneas futuras

Como se ha ido presentando a lo largo de los apartados que conforman la memoria, Bluetooth Low Energy aplicado a redes mesh es un protocolo desarrolladorollado por Nokia e introducido en 2010 por el Grupo de Interés Especial de Bluetooth (SIG) como una nueva evolución del estándar Bluetooth. Esta evolución eliminó ciertas fronteras en la aplicabilidad que tenía la tecnología.

Esta evolución permite que BLEmesh ser una clara candidata a IoT, debido a que Bluetooth conecta hoy en día 8,2 mil millones de dispositivos y se proyecta que se utilizará en el 60 por ciento de los dispositivos inalámbricos para 2021. Bluetooth, como se ha comentado, ofrece varios tipos de comunicación, desde las comunicaciones clásicas (1:1) para la transmisión continua de voz / audio o transferencias de datos de dispositivo a dispositivo para la transmisión uno a muchos (1:m). Esta tecnología, obtiene un valor añadido con la creación de BLE mesh, lo que le permite agregar comunicaciones muchos a muchos (m:m) para aplicaciones de red a gran escala, como seguimiento de activos, automatización de edificios y hogares, iluminación y medición inteligente.

Como se comenta, existen diversas aplicaciones en las que BLE mesh podría sacar su máximo rendimiento, siendo todas ellas entornos interiores, como casas o edificios industriales. En comparación con Bluetooth, BLE está más relacionado con ZigBee en lo que respecta a las aplicaciones, ya que es menos costoso que el Bluetooth normal y consume poca batería.

Con todo y con eso BLE mesh presenta, además, algunas limitaciones pero la gran interoperabilidad que ofrece hace que las economías de escala asociadas con la venta de cientos de millones de dispositivos ciertamente le den una ventaja de costo y credibilidad. Lo que hace que BLE mesh y las redes de malla tomen en los próximos años una especial relevancia.

Como líneas futuras a este proyecto, se puede plantear el realizar simulaciones en entornos reales de IoT con el fin de correlar lo aquí presentado con un experimento en un escenario real y así poder valorar de manera experimental cual es la tecnología óptima para una Smart Home.

5.2. Lecciones aprendidas

Con este proyecto, he profundizado mis conocimientos en el mundo de las tecnologías inalámbricas aplicadas a IoT. Lo que me ayudará en mi carrera profesional debido a mi dedicación a las mismas.

Además, he aprendido, cosa que poco se hace en el día a día, a saber los inicios de un protocolo y conocer desde su capa física, modos de transmisión, espectro de frecuencias utilizados y por qué se diseñó para que fuese así, conocer su acceso al medio y las distintos modos de funcionamiento existentes y mejoras que se fueron incorporando al protocolo para hacerlo ideal para las redes de sensores en las que los requisitos son: baja tasa de transmisión, maximizar la vida útil de las baterías y gran escalabilidad.

5.3. Objetivos logrados y seguimiento de la planificación

Haciendo un balance crítico del trabajo pienso que se han cumplido todos los objetivos propuestos al inicio del trabajo, excepto uno: el realizar una evaluación empírica del mismo.

No se pudo realizar la evaluación empírica por motivos de trabajo del alumno y falta de tiempo por lo que se optó, con la aprobación del tutor, a que la evaluación fuese teórica pero aportando juicios de valor y un escenario concreto que permitiera evaluar por qué BLEmesh es mejor o peor que otras tecnologías.

La metodología prevista en un inicio sí fue la adecuada para la realización del trabajo pero en la planificación se hicieron algunas modificaciones con respecto a la inicial, debido a la búsqueda de información: se encontraron artículos de investigaciones interesantes que hicieron crear un apartado nuevo que en un principio no estaba propuesto.

7. Glosario

BLE: Bluetooth Low Energy

IoT: Internet of Things

M2M: Machine to Machine

SIG: Special Interest Group

LPWAN: Low-Power Wide-Area Network

UNB: Ultra Narrow Band

6LowPAN: IPv6 Low-power wireless Personal Area Network

NFC: Near Field Communication

IWSN: Industrial Wireless Sensor Networks

RT-BLE: Real-Time Bluetooth Low Energy

NB: Narrow Band

HCI: Host Controller Interface

L2CAP: Logical Link Control and Adaptation Protocol

ATT: Attribute Protocol

GATT: Generic Attribute Profile

GAP: Generic Access Profile

SMP: Security Manager Protocol

IETF: Internet Engineering Task Force

IPSP: Internet Protocol Support Profile

UDP: User Data Protocol

WSN: Wireless Sensor Network

MHTS: MultiHop Transfer Service

CSR: Cambridge Silicon Radio

TTL: Time To Live

8. Bibliografía

- [1]. T. Santhi Sri, J. R. (2016). A review on the state of art of Internet of Things. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 5.
- [2]. Bluetooth Industry. (s.f.). *Bluetooth*. Recuperado en Abril de 2018, de Bluetooth Technology: <https://www.bluetooth.com/bluetooth-technology>
- [3]. Kuor-Hsin Chang (Diciembre 2014). Bluetooth: A viable solution for IoT?. *IEEE Wireless Communications* , 2.
- [4]. Wireless IoT Connectivity: which standars can be used?. Recuperado en Marzo de 2018. <http://www.newelectronics.co.uk/electronics-technology/wireless-iot-connectivity-which-standards-can-be-used/74705/>
- [5]. C. Muthu Ramya, M. Shanmugaraj (2011). Study on ZigBee technology. *Electronics Computer Technology (ICECT), 2011 3rd International Conference*.
- [6]. L.F. Del Carpio, P. Di Marco (2017). Comparison of 802.11ah, BLE and 802.15.4 for a Home Automation Use Case. Springer Science Business Media New York 2017.
- [7]. Sigfox. Recuperado en Abril de 2018. <https://www.sigfox.com/en>
- [8]. LoRa Alliance. LoRaWAN. Recuperado en Marzo de 2018. <https://www.lora-alliance.org/technology>
- [9]. IETF. IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals. Recuperado en Abril de 2018. <https://tools.ietf.org/html/rfc4919>
- [10]. IEEE Spectrum. Why IoT needs 5G?. Recuperado en Abril de 2018. <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/computing/networks/5g-taking-stock>
- [11]. Near Field Communication Technology Standards. Recuperado en Abril de 2018. <http://nearfieldcommunication.org/technology.html>
- [12]. THREAD. Recuperado en Abril de 2018. <https://www.threadgroup.org/What-is-Thread>
- [13]. Domby domótica. ¿Qué es Z-Wave?. Recuperado en Abril de 2018. <http://domby.es/domotica-z-wave/>
- [14]. 11 Redes inalámbricas fundamentales para el Internet de las Cosas, Recuperado en Marzo de 2018. <https://www.redeweb.com/articulos/software/11-redes-inalambricas-fundamentales-para-internet-de-las-cosas/>

- [15]. Internet of Things: A Comparison of Communication Technologies. Recuperado en Abril de 2018. <https://blog.montem.io/2017/03/10/internet-of-things-a-comparison-of-communication-technologies/>
- [16]. Gaetano Patti, Luca Leonardi, Lucia Lo Bello (2015). A Bluetooth Low Energy real-time protocol for industrial wireless mesh networks. IEEE.
- [17]. Junaedi Adi Prasetyo, Artem Yushev, Prof. Dr.-Ing. Axel Sikora (2016). Investigations On The Performance Of Bluetooth Enabled Mesh Networking. The 3rd IEEE International Symposium on Wireless Systems.
- [18]. Argenox. A BLE advertising primer. Recuperado en Abril de 2018. <http://www.argenox.com/a-ble-advertising-primer/>
- [19]. DevZone. BLE Packet Structure. Recuperado en Abril de 2018. <https://devzone.nordicsemi.com/f/nordic-q-a/12211/ble-packet-structure>
- [20]. ResearchGate. A BLE Protocol Stack. Recuperado en Abril de 2018. https://www.researchgate.net/figure/A-BLE-protocol-stack-20_fig3_261242581
- [21]. Hyun-soo Kim, JungYub Lee, Ju Wook Jang (2015). BLEmesh: A Wireless Mesh Network Protocol for Bluetooth Low Energy Devices.
- [22]. PrithviRaj Narendra, Simon Duquennoy and Thiemo Voigt. BLE and IEEE 802.15.4 in the IoT: Evaluation and Interoperability Considerations.
- [23]. S.M. Darroudi, C. Gómez (2017). Bluetooth Low Energy Mesh Networks: A Survey. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [24]. IETF. The Trickle Algorithm. Recuperado en Abril de 2018. <https://tools.ietf.org/html/rfc6206>
- [25]. Konstantin Mikhaylov, Jouni Tervonen (2013). Multihop data transfer service for Bluetooth Low Energy. Published in: ITS Telecommunications (ITST), 2013 13th International Conference on.
- [26]. Bluetooth Mesh Network. Recuperado en Abril de 2018. <https://blog.bluetooth.com/introducing-bluetooth-mesh-networking>
- [27]. Qualcomm: An Introduction to CSRmesh. Recuperado en Abril de 2018. <https://www.qualcomm.com/solutions/networking/features/csr-mesh>
- [28]. Silicon Lab: Benchmarking Bluetooth Mesh, Thread, and Zigbee Network Performance. Recuperado en Mayo de 2018. <https://www.silabs.com/products/wireless/learning-center/mesh-performance>.
- [29]. S.Silva, T.Fernandes, A.Valente (2014). Coexistence and Interference Tests on a Bluetooth Low Energy Front-End. Published in: Science and Information Conference 2014

[30] SOME INTERESTING BITS ABOUT LATENCY. Recuperado en Junio de 2018. <https://www.citycloud.com/some-interesting-bits-about-latency/>