

ESTUDIO EN DETALLE Y EVALUACIÓN DEL PROTOCOLO BLE MESH

Ricardo Gabriel Portillo Criado

Máster universitario en Ingeniería de Telecomunicación
UOC-URL

Universitat Oberta de Catalunya



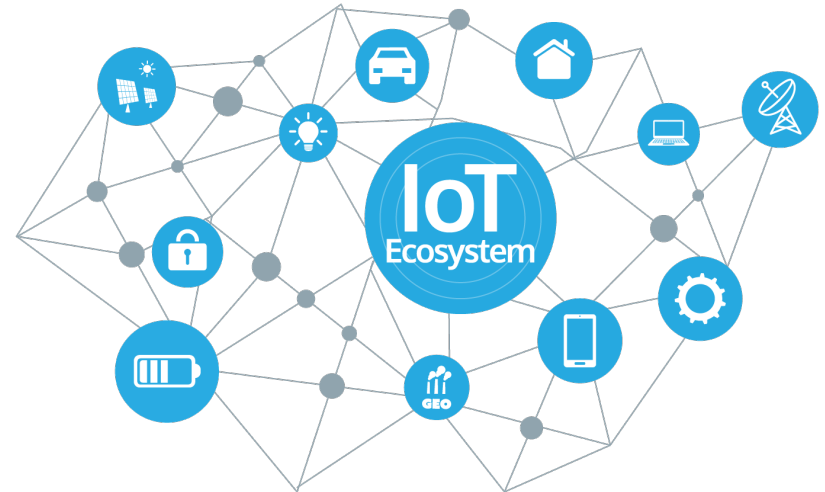
ÍNDICE

- Introducción
 - Objetivos del proyecto
 - Distribución temporal
- Estado del arte
- Bluetooth Low Energy (BLE)
 - Introducción a BLE
 - Conceptos básicos
- Protocolos/Aplicaciones de BLE para redes mesh
 - Soluciones estandarizadas
 - Soluciones/propuestas académicas
 - Soluciones patentadas
- Evaluación BLE mesh
 - Limitaciones
 - Caso de uso propuesto y métricas
 - Evaluación BLE: entorno indoor
 - Evaluación BLE: comparativa con otras tecnologías
- Conclusiones

INTRODUCCIÓN

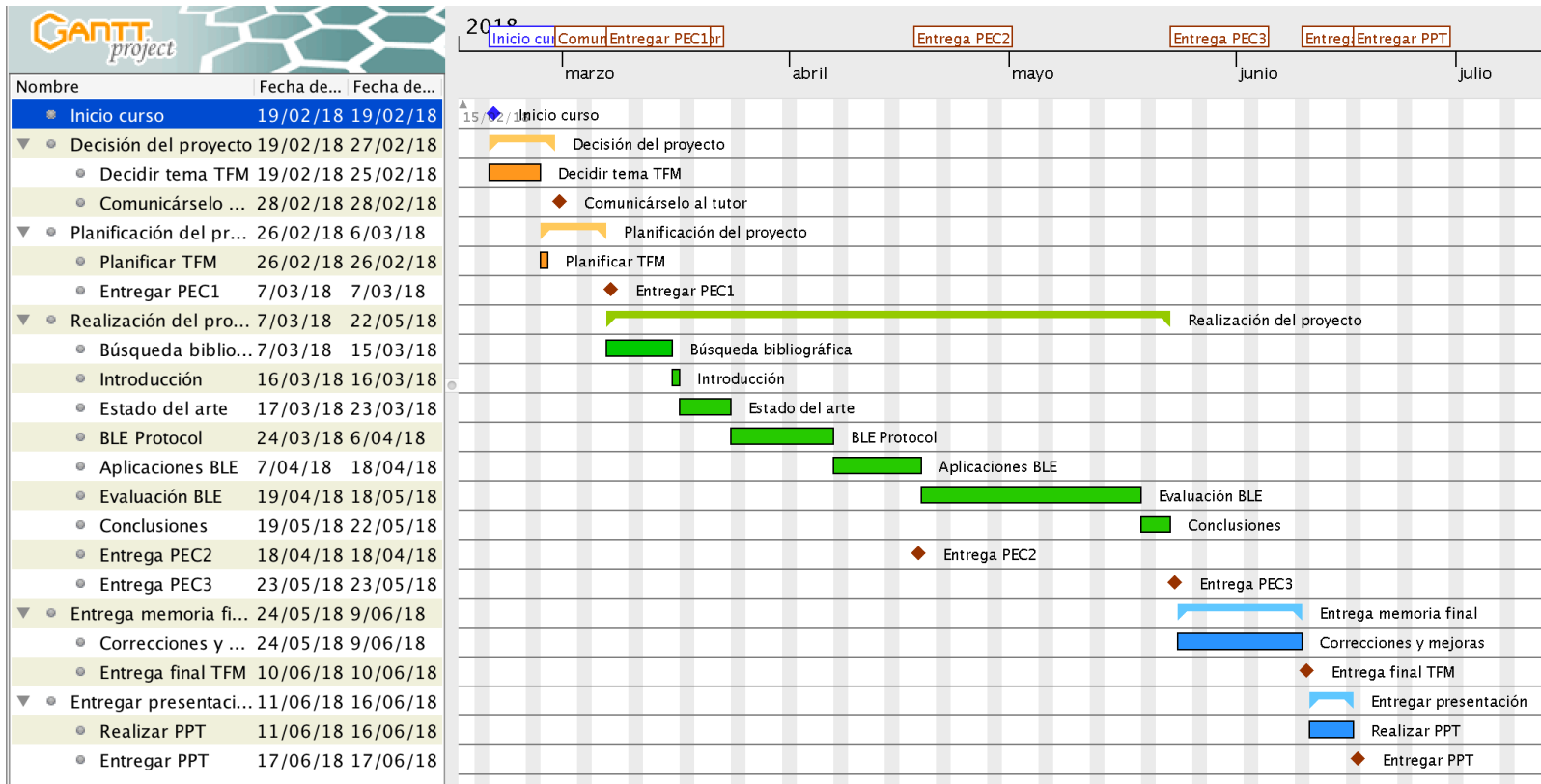
- Objetivos del proyecto

- ❑ Realizar un estado del arte de las tecnologías IoT actuales.
- ❑ Definir en detalle BLE mesh.
- ❑ Identificar casos de uso de BLE mesh.
- ❑ Evaluar BLE mesh y realizar una comparativa con otras tecnologías.



INTRODUCCIÓN

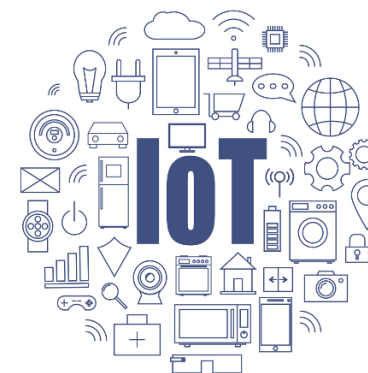
- Distribución temporal (diagrama de Gantt)



ESTADO DEL ARTE (I)

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)



ESTADO DEL ARTE (Y II)

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

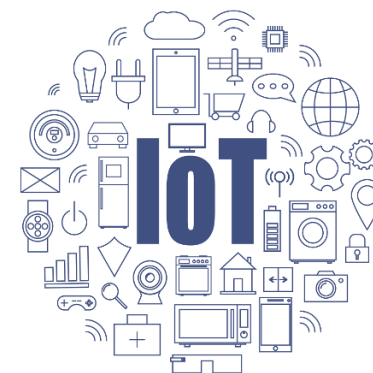


Tabla 2 - Tabla comparativa de las tecnologías IoT (II)

BLE: INTRODUCCIÓN

• Bluetooth

- Protocolo de comunicación inalámbrico desarrollado por Ericsson.
- Limitaciones: consumo de energía elevado, alcance y necesidad de emparejar dispositivos.
- Para resolverlas, Nokia desarrolló BLE.

• Bluetooth Low Energy (BLE o Bluetooth Smart)



- Desarrollado por Nokia e introducido por SIG en 2010.
- Tecnología de corto alcance (50-150m), comunicaciones de bajo consumo de energía (consume 16mA) y gran interoperabilidad.
- Permite operar en entornos IoT y M2M.
- BLE mesh permite operar en redes malladas (mesh)

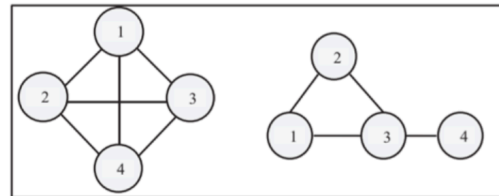


Figura 1 - Modos de conexión redes mesh: malla conexión completa, izquierda, y malla conexión parcial, derecha [17]

BLE: INTRODUCCIÓN (I)

- Capa física BLE

- 40 canales de 2MHz
 - 3 señalización -> Descubrimiento y establecimiento conexión
 - 37 canales de datos -> Por donde fluye la comunicación

- Canales de señalización (37,38 y 39) situados estratégicamente en el espectro para evitar interferencias en su banda de operación (2.4GHz).

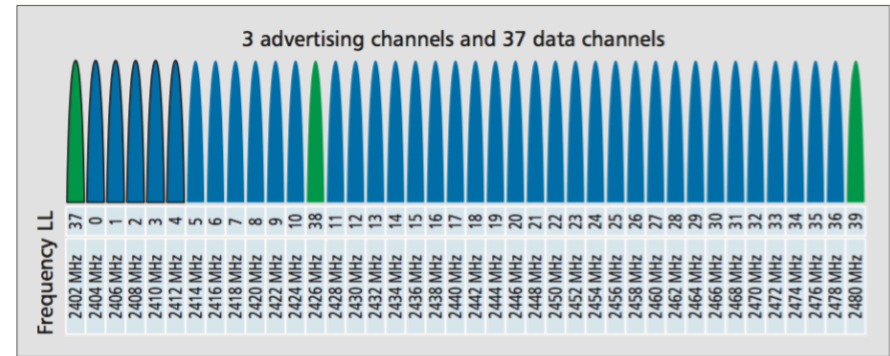


Figura 3 - BLE: Distribución de canales [3]

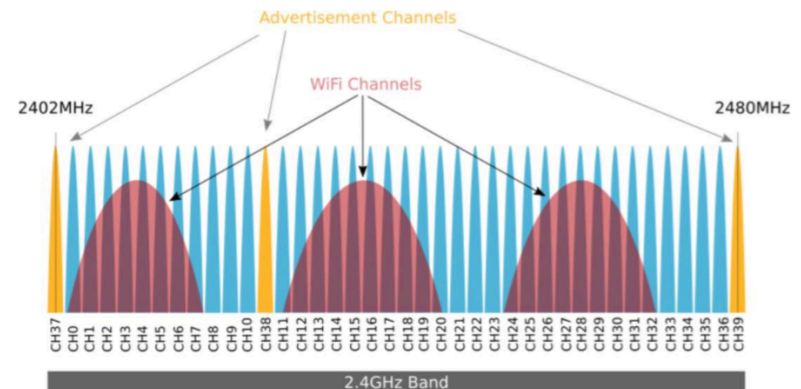


Figura 4 - BLE. Canales BLE y WiFi [18]

BLE: INTRODUCCIÓN (II)

- Formato trama BLE

- Tamaño ideal para transacciones en redes de sensores
 - 1 byte de preámbulo
 - 4 bytes de código de acceso
 - 3 bytes de código de redundancia cíclica (CRC)
 - 2 a 39 bytes de PDU

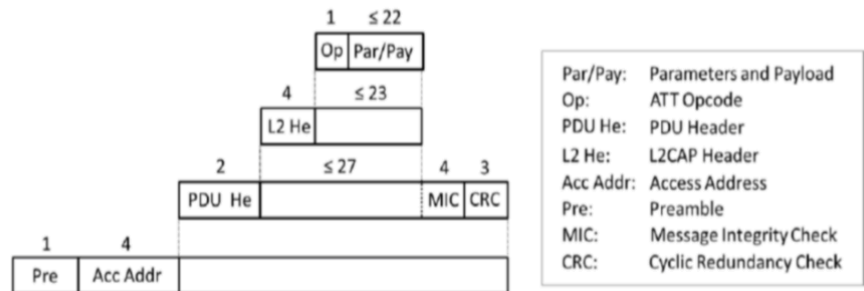


Figura 5 - BLE: Formato trama [19]

- Pila de protocolos BLE

- Dividida en la **parte del controlador** (capa física + capa de enlace) y la **parte del host** (la cual se ejecuta en el procesador de las aplicaciones).
- Pila adaptada de Bluetooth a BLE -> Versiones más ligeras.

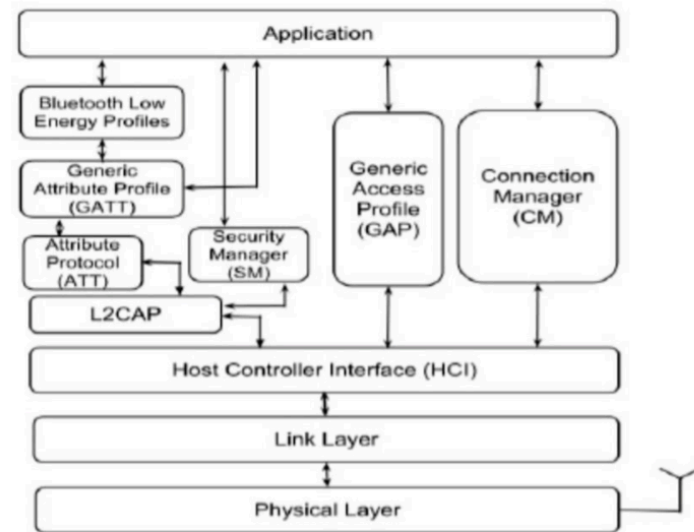


Figura 6 - BLE: Pila de protocolos [20].



BLE: INTRODUCCIÓN (Y III)

- Capa de enlace BLE

- Define los estados del nodo:
 - **Publicidad (*advertising*)** -> transmite periódicamente en canales de señalización.
 - **Escaneo (*scanning*)** -> escucha los canales de señalización.
 - **Conexión (*connection*)** -> inicia conexión al recibir un anuncio.
- Se definen dos roles:
 - **Maestro:** coordina el acceso al medio basado en TDMA, donde sondea esclavos periódicamente
 - **Esclavo.**
- Topología en estrella con un maestro y varios esclavos.

- Acceso al medio

- **Evento de conexión (CE)** comienza con la transmisión de paquetes de un maestro (M) a un esclavo (S)
- Los tiempos de inicio de los CE espaciados en un intervalo denominado **intervalo de conexión (CI)**.
- Si ninguno dispositivo transmite -> Esclavo cambia a modo de espera y Maestro se comunica con otro Esclavo (proceso iterativo hasta que todos transmitan).
- Una vez todo los Esclavos hayan transmitido, el Maestro se queda dormido hasta CE.

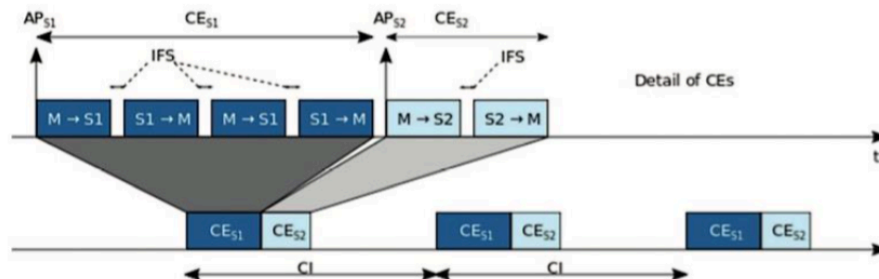


Figura 8 - BLE mecanismo de acceso al medio [16]

PROTOS/PLICACIONES DE BLE PARA REDES MESH (I)

- **BLE mesh** tecnología **óptima** para **IoT**, aunque presenta **desafíos**.
- Diversos estándares o estudios/investigaciones tratan de abordar estos desafíos.
- Estas soluciones se dividen en:
 - Soluciones estandarizadas
 - Soluciones académicas
 - Soluciones patentadas
- Dentro de las académicas se subdivide en:
 - Basadas en difusión (*flooding-based*) → no realizan encaminamiento, inundan la red con mecanismos de difusión (**canales de publicidad**).
 - Basadas en encaminamiento (*routing-based*) → hacen uso de protocolos de encaminamiento para el reenvío de paquetes (**canales de datos**).

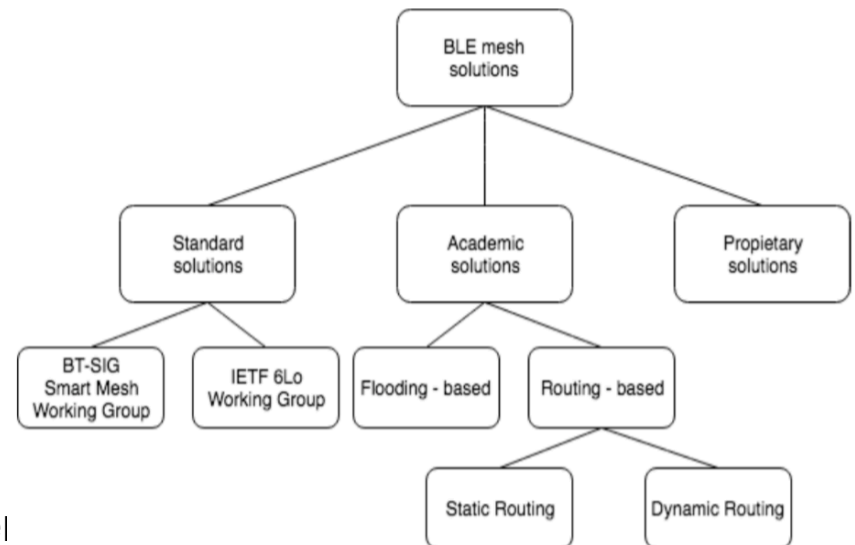


Figura 9 - Soluciones BLE a redes mesh [23]

PROTOSCOLOS/APLICACIONES DE BLE PARA REDES MESH (II)

Soluciones estandarizadas

- Dos organizaciones responsables: **IETF** y **Bluetooth SIG**.
- Bluetooth SIG anunció en 2015 **Bluetooth Smart Mesh**, que permite a BLE soportar topologías mesh.
- IETF publicó en 2015 **IPv6 over BLE Mesh Networks** (RFC7668), que adaptaba 6LoWPAN para soportar IPv6 sobre redes BLE.



Soluciones patentadas

- Soluciones diseñadas para domótica y / o iluminación, así como otros casos de uso de IoT.
 - Más importante **CSRMesh** (publicada en 2015).

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

CSRMESH



PROTOSCOLOS/APLICACIONES DE BLE PARA REDES MESH (Y III)

Soluciones académicas basadas en difusión

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*)

Soluciones académicas basadas en encaminamiento

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 adecuada 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*)



EVALUACIÓN BLE MESH

Limitaciones BLE

- Para ser compatible con BLE se requiere **Bluetooth 4.0 o 5.0** → Solución: dispositivos no compatibles hagan de **proxies** en la malla.
- Problemas en aplicaciones en **tiempo real** → Solución: **RT-BLE**, protocolo que permite a BLE acotar el retraso en sus mensajes.
- **Seguridad** al sólo encriptarse los mensajes en los canales de datos, no en señalización → Solución: basar las redes en **IPv6** y hacer uso de TLS.
- **Problemas de privacidad**, direcciones IP privadas, crean sobrecarga en tablas de enrutamiento → Solución: esquema coordinado.
- **Interoperabilidad** entre soluciones académicas y patentadas → Solución: Ceñirse al **IETF** y **Bluetooth SIG**

Caso de uso bajo estudio

- **Entornos outdoor**, descartados al estar **dominados** por soluciones **LWPAN**.
- Estudio focalizado en **entorno indoor**, como una **Smart Home** o edificio inteligente, debido a su alcance (50-150m).

Métricas

- Comportamiento ante interferencias en misma banda 2.4GHz (WiFi).
- Latencia en función número de nodos/saltos.
- Velocidad transmisión

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].



EVALUACIÓN BLE MESH: ENTORNO INDOOR (I)

Comportamiento frente a interferencias

- Entornos indoor, como Smart Home, típicamente existirán otros dispositivos WiFi, Bluetooth o Zigbee.
 - **Interferencias WiFi** → sin efecto en la tasa de error de bit o la lectura RSSI (que aumenta). Saltos en frecuencia efectivos.
 - **Interferencias Zigbee** → posibles colisiones y pérdidas de paquetes.
 - **Interferencias Bluetooth Classic** → posible existencia de colisiones.

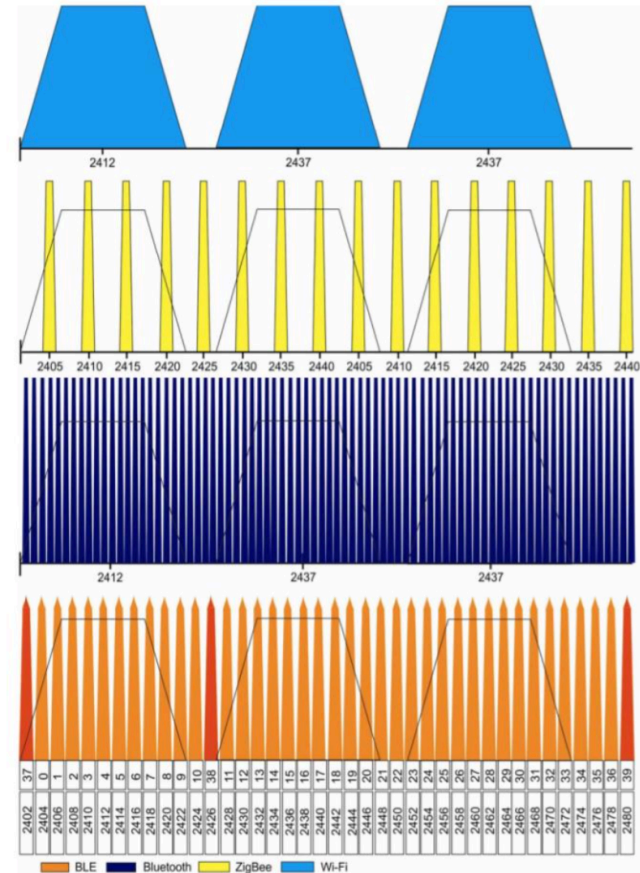


Figura 15 - Espectro de frecuencias de BLE, Bluetooth, Zigbee y WiFi [29].

EVALUACIÓN BLE MESH: ENTORNO INDOOR (II)

Latencia frente a número de saltos sin fragmentación

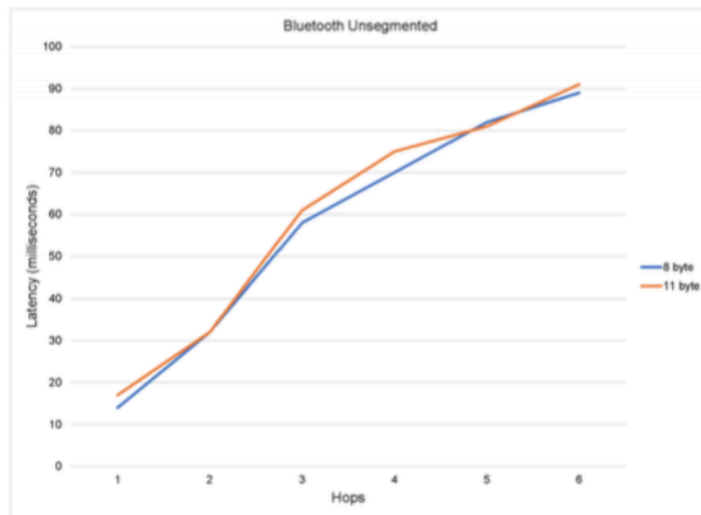


Figura 11 - Latencia en función del número de saltos paquetes no fragmentados [28]

- BLE segmenta paquetes superiores a 11bytes.
- Paquetes < 11bytes → latencia crece conforme aumenta el número de saltos (hasta 80 y 90 ms)
- Latencia ideal para entorno IoT.

Latencia frente a número de saltos con fragmentación

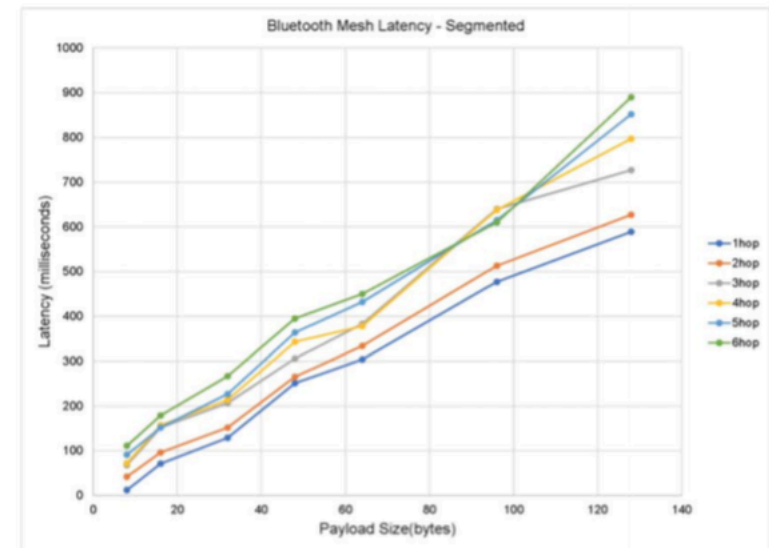


Figura 12 - Latencia en función del número de saltos con fragmentación [28]

- Comportamiento casi lineal en función del número de saltos y la carga útil a transmitir.
- Llega a alcanzar, en el peor de los casos latencias de hasta 600-900ms → Inválido para navegación web o tráfico en tiempo real.

EVALUACIÓN BLE MESH: ENTORNO INDOOR (Y III)

Latencia frente a número de nodos

- **Red de 24 nodos**, parecida a posible red en una Smart Home (alcance BLE 50-150m).
- Porcentaje de paquetes recibidos a una latencia para un tamaño de paquete fijado (8, 16 o 32 bytes).+
- A medida que **aumenta carga útil** a transmitir, el **porcentaje de paquetes** que se recibe a **latencias mayores** crece.
- **Sin fragmentación** (8bytes), un gran porcentaje de paquetes (**casi el 90%**), se recibe con una latencia inferior a **30ms**.

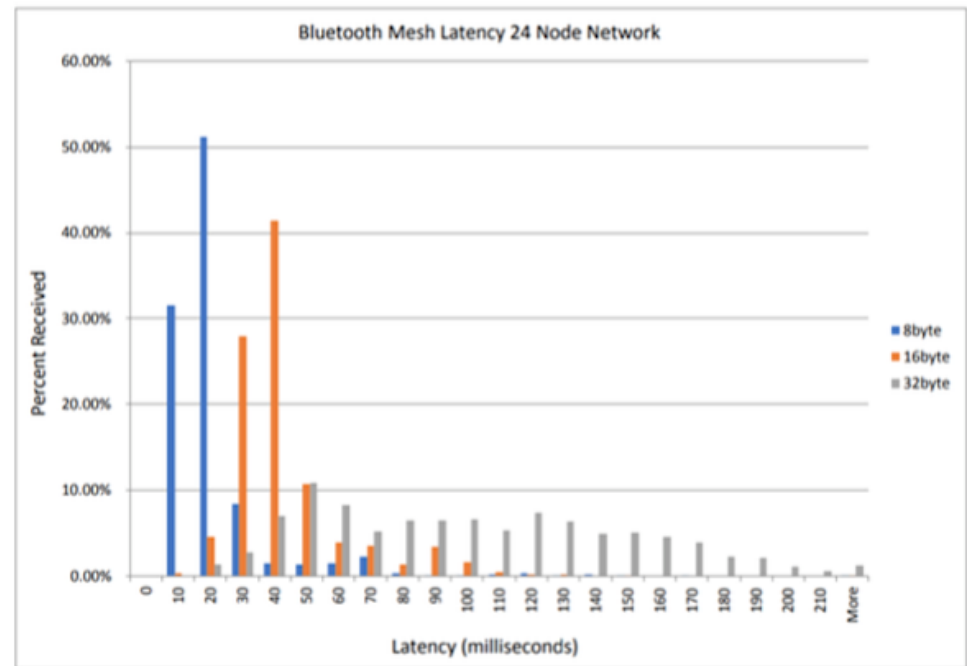


Figura 13 - Latencia en función del tamaño de la red (red pequeña) [28]

EVALUACIÓN BLE MESH: ENTORNO INDOOR. COMPARATIVA CON OTRAS TECNOLOGÍAS (I)

Latencia frente a número de saltos

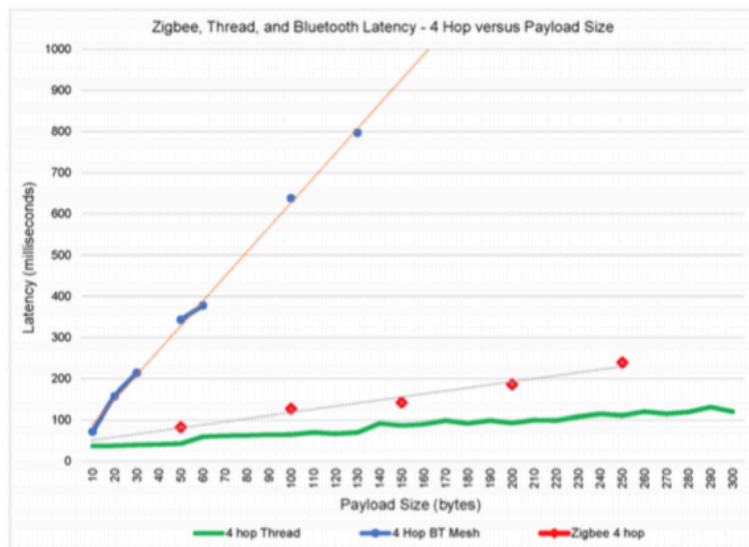


Figura 17 - Comparativa latencia en función de la carga útil para 4 saltos[28]

- Latencia aumenta conforme aumenta la carga útil para todas las tecnologías.
- Gran **dependencia** existente de la **fragmentación** → Congestiona la red.
- **Segmentación** en BLEmesh **agrega latencia** a la comunicación.

Latencia frente a número de nodos

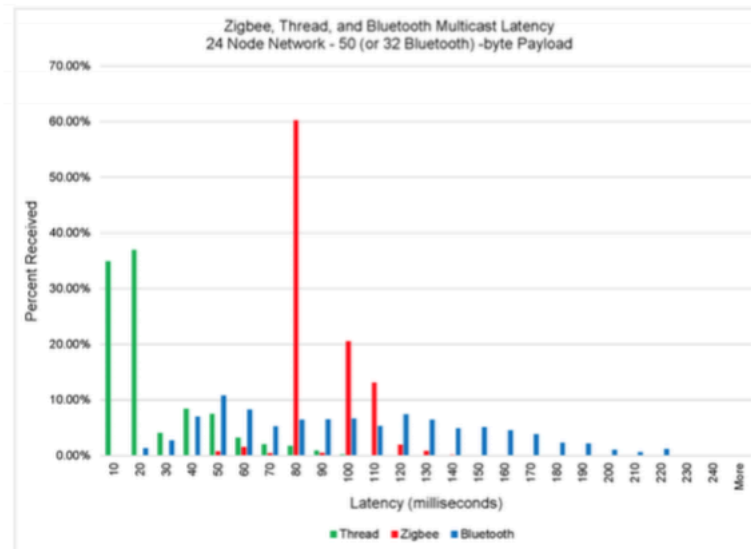


Figura 19 – Comparativa latencia en función del tamaño de la red (red pequeña) [28]

- **Thread** la latencia aumenta ligeramente; en **Zigbee**, aumenta y se expande; y **BLEMesh**, la latencia se distribuye desde 20 milisegundos hasta 220 milisegundos.
- **Thread** presenta una **latencia resistente** al número de nodos, en comparación con BLE y Zigbee.



EVALUACIÓN BLE MESH: ENTORNO INDOOR. COMPARATIVA CON OTRAS TECNOLOGÍAS (Y II)

Velocidad de transmisión frente a número de saltos

- Velocidad de transmisión no es un requisito imprescindible IoT (**velocidades típicas 100-200kbps**).
- Paquetes que requieran segmentación (100-96 bytes).
- **Zigbee** y **Thread**, presentan **mayores velocidades** que BLEmesh.
- **BLEmesh** velocidad **constante 1Mbps**.

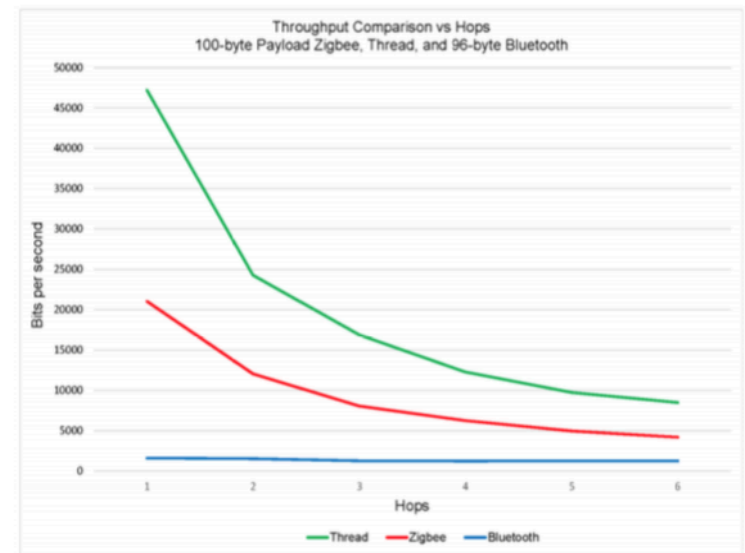


Figura 22 - Comparativa velocidad de transmisión en función del número de saltos (paquetes gran tamaño)[28]

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Conclusiones evaluación BLE

- Caso de uso evaluado: **entorno indoor**.
- **Entornos** con baja carga de datos como una **Smart Home**, tanto BLEmesh como Zigbee y Thread presentan comportamientos similares.
- **Entornos** con requisitos de red más **estrictos**, Thread y Zigbee, presentan mejores resultados que BLEmesh.
- **Costes**: tres tecnologías comparadas son de **bajo coste**.
- **BLE** ofrece algo que las demás no → **Interoperabilidad** (gran ventaja).
- BLEmesh tecnología nueva y necesita madurar.

Conclusiones y líneas futuras proyecto

- BLEmesh protocolo desarrollado por Nokia e introducido en 2010 por Bluetooth SIG.
- BLE claro candidato como tecnología IoT al estar presente en 8.2 millones de dispositivos.
- Máximo rendimiento en entornos interiores (indoor) como Smart Home.
- Presenta ciertas limitaciones pero ofrece gran interoperabilidad.
- Líneas futuras: realizar simulaciones en entornos reales IoT para correlar la información presentada.

