



REDES WIRELESS PAN 802.15: BLUETOOTH Y ZIGBEE

Ingeniería de Redes



Índice

WPAN	3
¿Como funcionan las Redes WPAN?	3
Evolución	3
Conceptos actuales	3
Ventajas	4
Desventajas	4
¿En qué se diferencian una red PAN con una WPAN?	5
Comparación entre WPAN, WLAN, WMAN y WWAN	5
Ejemplos de redes WPAN	6
Conclusiones y trabajos futuros	6
IEE 802.15	6
Grupo de trabajo 1 (WPAN/Bluetooth).....	7
Grupo de trabajo 2 (Coexistencia).....	7
Grupo de trabajo 3 (WPAN de alta velocidad)	7
Grupo de trabajo 4 (WPAN de baja velocidad)	7
Grupo de trabajo 5 (Redes en malla)	7
Grupo de trabajo 6: Red de Área Corporal (Body Area Network, BAN)	7
Grupo de trabajo 7 Comunicación de Luz Visible (Visible Light Communication, VLC)	7
Grupo de trabajo 8 Comunicación por pares (Peer Aware Communication, PAC)	7
Grupo de trabajo 9 Protocolo de Administración de Claves (Key Management Protocol, KMP)	8
Grupo de trabajo 10 Grupo de trabajo 10: Enrutamiento de capa 2	8
Bluetooth	8
Tipos de Bluetooth	8
Topología de red Bluetooth	10
Versiones de Bluetooth sin BLE	11
Versiones Bluetooth con BLE	12
Ventajas y desventajas del Bluetooth	12
Zigbee	14

Comparación y conclusión	18
Comparación técnica: Bluetooth vs Zigbee	18
¿Cuándo usar cada tecnología?	19
Tendencias emergentes en WPAN	20
Conclusión.....	21
Bibliografía	22

WPAN

Cuando hablamos del término WPAN, nos referimos a una red inalámbrica de área personal. WPAN son sus siglas en inglés. Aquí se incluyen redes inalámbricas de corto alcance que no abarcan un área de más de unas decenas de metros. Estas redes son utilizadas para conectar dispositivos muy variados como, por ejemplo, impresoras, móviles, ordenadores, etc. Todo esto de manera inalámbrica, sin necesidad de usar ningún tipo de cable.



Debemos tener en cuenta que WPAN no es una tecnología única. Dentro de este estándar, podemos incluir diferentes tecnologías que permiten conectar dispositivos de manera inalámbrica. Para poder utilizar las redes WPAN, necesitamos una serie de componentes. Lo primero que necesitamos es un emisor, que es el dispositivo que crea la petición o señal. Por otro lado, necesitamos tener un codificador para que la señal sea transmitida, la línea (ondas, infrarrojos, etc.), así como el decodificador [17]

¿Como funcionan las Redes WPAN?

Las conexiones/redes WPAN funcionan mediante tecnologías de transmisión inalámbricas de corto alcance, como Bluetooth, Zigbee, NFC.

- Estas tecnologías permiten la conexión inalámbrica de dispositivos cercanos entre sí y la transferencia de datos a través de ondas de radio o señales infrarrojas.
- Los dispositivos WPAN utilizan antenas de radio y protocolos de comunicación inalámbrica para conectarse entre sí, lo que les permite compartir datos y recursos.
- Los dispositivos WPAN también pueden estar equipados con sensores y transmisores para recopilar o transmitir datos en tiempo real. [18]

Evolución

Las comunicaciones inalámbricas experimentaron un crecimiento muy importante dentro de la última década (GSM, IS-95, GPRS y EDGE, UMTS, y IMT-2000). Estas tecnologías permitieron una alta transferencia de datos dentro de las soluciones de redes inalámbricas o sistemas. La ventaja de las comunicaciones inalámbricas es que con la terminal la persona se puede mover por toda el área de cobertura, lo que no ocurre con las redes de comunicaciones fijas, esto permitirá el desarrollo de diferentes soluciones PAN y cambiará el concepto de los espacios personales. [19]

Conceptos actuales

El espacio personal abarca toda el área que puede cubrir la voz. Puedes tener una capacidad en el rango de los 10 Terabps hasta los 10 terabps. Existen soluciones (ejemplo, Bluetooth) que operan en la frecuencia libre para instrumentación, ciencia y medicina de sus siglas en inglés

(instrumental, scientific, and medical ISM) en su respectiva banda de frecuencia de 2.4 GHz. Los sistemas PAN podrán operar en las bandas libres de 5 GHz o quizás mayores a estas. PAN es un concepto de red dinámico que exigirá las soluciones técnicas apropiadas para esta arquitectura, protocolos, administración, y seguridad.

PAN representa el concepto de redes centradas en las personas, y que les permiten a dichas personas comunicarse con sus dispositivos personales (ejemplo, PDAs, tableros electrónicos de navegación, agendas electrónicas, computadoras portátiles) para así hacer posible establecer una conexión inalámbrica con el mundo externo.



Ventajas

- **Comodidad:** Las WPAN ofrecen la comodidad de una conexión inalámbrica para transferir datos y conectar dispositivos cercanos
- **Portabilidad:** Al ser una red de corto alcance, los dispositivos WPAN son portátiles y fáciles de transportar, lo que los hace ideales para dispositivos electrónicos personales como teléfonos móviles
- **Bajos consumo de energía:** Los dispositivos WPAN utilizan tecnologías de transmisión inalámbrica de baja energía, lo que permite una mayor duración de la batería de los dispositivos portátiles
- **Interoperabilidad:** La compatibilidad entre diferentes dispositivos y marcas en una red WPAN permite una mayor flexibilidad
- **Seguridad:** Las WPAN utilizan tecnologías de encriptación para proteger los datos transferidos entre dispositivos, lo que las hace más seguras que las conexiones inalámbricas abiertas

Desventajas

- **Alcance limitado:** Las WPAN tienen un alcance de hasta 10 metros; significa que los dispositivos deben estar muy cerca entre sí.
- **Interferencia:** Las señales inalámbricas de las WPAN pueden interferir con otras redes inalámbricas cercanas, como redes Wi-Fi y Bluetooth, lo que puede causar problemas de rendimiento
- **Velocidad de transferencia limitada:** A pesar de que las redes WPAN pueden transferir datos a altas velocidades para dispositivos cercanos entre sí, esta velocidad es limitada en comparación con las redes inalámbricas de mayor alcance.
- **Dependencia de la tecnología:** Depende de la tecnología inalámbrica; significa que los dispositivos deben ser compatibles con estas tecnologías para conectarse entre sí.

- **Seguridad:** Aunque las redes WPAN utilizan tecnologías de encriptación para proteger los datos transferidos entre dispositivos, todavía pueden ser vulnerables a ataques de seguridad como el robo de identidad y la interceptación de datos

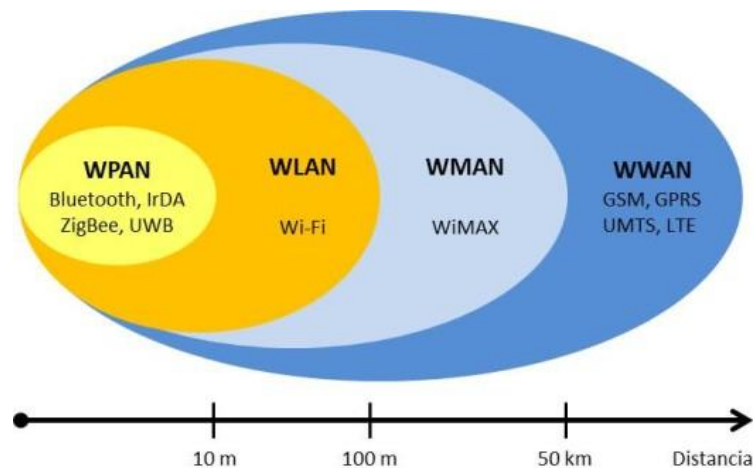
¿En qué se diferencian una red PAN con una WPAN?

La diferencia entre una red WPAN y una PAN es que las redes WPAN se refiere específicamente a una red inalámbrica de corto alcance, mientras que las redes PAN pueden ser inalámbricas o no y puede cubrir un área más amplia.

- Una red PAN puede incluir dispositivos que no sean inalámbricos, como dispositivos USB conectados directamente a una computadora portátil; mientras que una WPAN siempre utiliza tecnología de transmisión inalámbrica como Bluetooth o ZigBee
- Otra diferencia es que las WPAN se enfocan en conectar dispositivos electrónicos personales cercanos entre sí, mientras que una PAN puede ser utilizada en cualquier entorno donde se requiera conectar dispositivos cercanos entre sí, como en una oficina o un hogar

Comparación entre WPAN, WLAN, WMAN y WWAN

Tipo de red	Alcance	Aplicación Típica	Consumo energético	Ejemplos de tecnologías
WPAN	Corto (hasta 10 m)	Wearables y periféricos personales	Muy bajo	Bluetooth, Zigbee
WLAN	Medio (hasta 100 m)	Hogares y oficinas	Moderado	WiFi
WMAN	Urbano (hasta 50 km)	Redes municipales o empresariales	Alto	WiMax
WWAN	Global	Conexión móvil a gran escala	Alto	LTE, 5G



Ejemplos de redes WPAN

Algunos ejemplos de redes WPAN son los siguientes:

- **Bluetooth:** Es una de las tecnologías de transmisión inalámbrica más populares para las WPAN, y se utiliza para conectar dispositivos como teléfonos móviles, laptops, auriculares inalámbricos o altavoces.
- **Zigbee:** Es una tecnología de baja energía utilizada en la automatización del hogar, el monitoreo de sensores y otros dispositivos que requieren un bajo consumo de energía
- **NFC (Near Field Communication):** Es una tecnología inalámbrica de corto alcance utilizada para la transferencia de datos, el pago móvil y otras aplicaciones de conectividad en dispositivos electrónicos.
- **Infrarrojo:** Es una tecnología de transmisión inalámbrica que se utiliza para transferir datos entre dispositivos electrónicos cercanos, como controles remotos de televisores y cámaras digitales.
- **Antenas RFID:** Son sistemas de identificación por radiofrecuencia que utilizan tecnología inalámbrica para identificar y rastrear objetos, animales y personas, y se utilizan en aplicaciones como la logística y el seguimiento de inventarios

Conclusiones y trabajos futuros

PAN introduce un concepto de espacio personal dentro del mundo de las telecomunicaciones. Esto se convertirá en extensiones de redes, dentro del mundo personal, lo cual supone una gran variedad de nuevas características para resolver las demandas de los servicios de redes. Los usuarios rodeados por sus espacios personales pueden moverse en su espacio y ejecutar aplicaciones en las diferentes redes. Varias tecnologías están listas para nuevas soluciones e ideas, e incluso cosas inimaginables en el momento.

IEEE 802.15

Es un grupo de trabajo dentro de IEEE 802 especializado en redes inalámbricas de área personal. Se divide en 10 áreas de trabajo, aunque no todas están activas actualmente. El número de grupos de trabajo varía dependiendo del número de proyectos activos.



Los estándares que desarrolla definen redes tipo PAN o HAN, centradas en las cortas distancias. Al igual que Bluetooth o ZigBee, el grupo de estándares 802.15 permite que dispositivos portátiles como PC, PDAs, teléfonos, sensores y actuadores utilizados en domótica, entre otros, puedan comunicarse e interoperar. Debido a que Bluetooth no puede coexistir con una red inalámbrica 802.11.x, se definió este estándar para permitir la interoperabilidad de las redes inalámbricas LAN con las redes tipo PAN o HAN. [20]

Grupo de trabajo 1 (WPAN/Bluetooth)

- Basado en la especificación Bluetooth 1.1.
- Define las capas físicas (PHY) y de control de acceso al medio (MAC) para redes WPAN.
- Estándares publicados en 2002 y 2005.

Grupo de trabajo 2 (Coexistencia)

- Aborda la coexistencia de WPAN con otras redes inalámbricas en bandas no licenciadas, como WLAN.
- Estándar publicado en 2003; el grupo se encuentra inactivo desde entonces.

Grupo de trabajo 3 (WPAN de alta velocidad)

- Diseñado para aplicaciones multimedia que requieren altas tasas de transferencia (11–55 Mbps).
- Incluye mejoras en la capa MAC y una PHY alternativa basada en ondas milimétricas

Grupo de trabajo 4 (WPAN de baja velocidad)

- Orientado a dispositivos de bajo consumo y baja complejidad, como sensores.
- Base para tecnologías como Zigbee, Thread y 6LoWPAN.
- Incluye extensiones para aplicaciones industriales y regionales.

Grupo de trabajo 5 (Redes en malla)

- Proporciona un marco para redes WPAN en topología de malla, tanto de baja como de alta velocidad.
- Soporta características como multihop, multidifusión y ahorro de energía

Grupo de trabajo 6: Red de Área Corporal (Body Area Network, BAN)

- Optimizado para dispositivos de bajo consumo que operan en o alrededor del cuerpo humano.
- Aplicaciones en salud, entretenimiento y electrónica de consumo.

Grupo de trabajo 7 Comunicación de Luz Visible (Visible Light Communication, VLC)

- Define la comunicación inalámbrica utilizando luz visible.
- Aplicaciones en entornos donde las radiofrecuencias están restringidas.

Grupo de trabajo 8 Comunicación por pares (Peer Aware Communication, PAC)

- Estándar para comunicaciones peer-to-peer sin infraestructura, con coordinación distribuida.

- Incluye descubrimiento de dispositivos, posicionamiento relativo y seguridad.

Grupo de trabajo 9 Protocolo de Administración de Claves (Key Management Protocol, KMP)

- Define prácticas recomendadas para el transporte de datagramas de protocolos de gestión de claves.
- Complementa la seguridad en redes basadas en IEEE 802.15.4.

Grupo de trabajo 10 Grupo de trabajo 10: Enrutamiento de capa 2

- El IEEE 802.15.10 recibió la aprobación para formar el grupo de trabajo 10 el 23 de agosto de 2017 según la página oficial de IEEE
- Su intención era desarrollar una práctica recomendada para el enrutamiento de los paquetes en la red inalámbrica dinámica cambiante de 802.15.4. Estas prácticas debían tener un impacto mínimo en el manejo del enrutamiento. El objetivo era extender el área de cobertura conforme fuera aumentando el número de nodos.

Bluetooth

Jaap Haartsen está considerado el padre de Bluetooth, ya que fue él quien, en 1994, en la sede sueca de Ericsson, empezó a investigar la manera de sincronizar dos aparatos electrónicos transmitiendo voz y datos por radiofrecuencia. [1]



La tecnología inalámbrica de corto alcance, Bluetooth, permite que dos o más dispositivos realicen una comunicación punto a punto directamente sin necesidad de infraestructura de red de respaldo como un enrutador inalámbrico o un punto de acceso. Hoy en día, la tecnología Bluetooth es la más comúnmente usada por las personas de todo el mundo para conectar dispositivos inalámbricos como audífonos, teclados, ratones y altavoces tanto a PCs como a dispositivos móviles. [2]

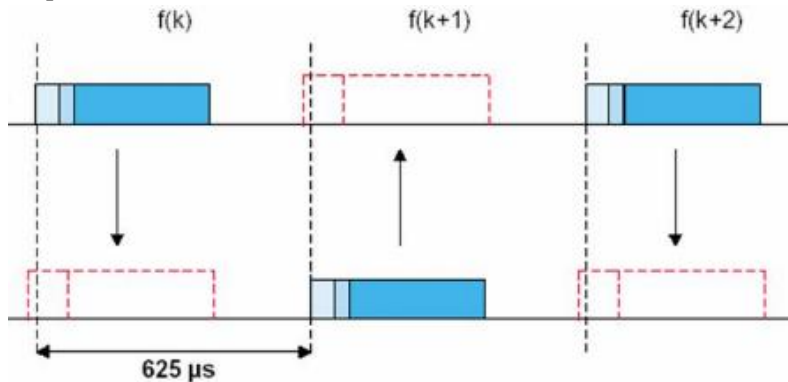
Tipos de Bluetooth

Hoy en día se utilizan 2 estándares [2] [3]:

- **Bluetooth Classic:** es un sistema de espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS), que es una técnica de modulación en el que la señal se emite sobre una serie de radiofrecuencias aparentemente aleatorias, saltando de frecuencia en frecuencia sincrónicamente con el transmisor. Para ahondar un poco más hay que decir que Bluetooth Classic es específicamente FH/TDD (salto de frecuencia/división de tiempo dúplex), que por así decir es una subrama de FHSS. Consiste en que el canal queda dividido en intervalos de 625 μ s, llamados slots, donde cada salto de frecuencia es ocupado por un slot. Esto da lugar a una frecuencia de salto de 1600 veces por segundo,

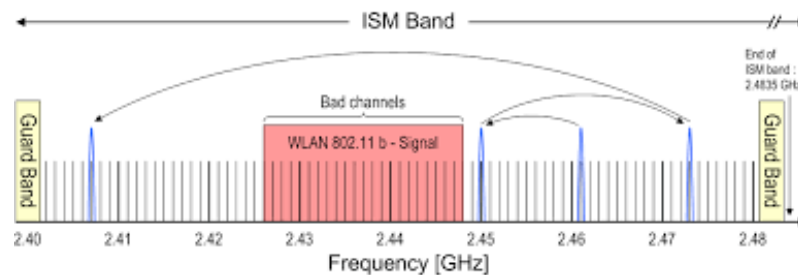
en la que un paquete de datos ocupa un slot para la emisión y otro para la recepción y que pueden ser usados alternativamente, dando lugar a un esquema de tipo TDD. Hay un total de 79 canales de 1MHz. Bluetooth Classic admite dos velocidades de datos distintas, la velocidad básica (BR) 700 kbits/seg, la cual fue el objetivo inicial de esta tecnología, y la velocidad de datos mejorada (EDR) 2-3 Mbits/seg, que llegó con Bluetooth 2.0. Ejemplo: altavoces inalámbricos utilizan este estándar ya que requieren una transmisión continua de audio.

Esquema FH/TDD:



- **Bluetooth Low Energy (BLE):** que está optimizado para bajo consumo de energía y se usa principalmente para aplicaciones que están restringidas por la autonomía de la batería. BLE permanece en modo de suspensión constantemente, excepto cuando se inicia una conexión. Los tiempos de conexión reales son solo de unos pocos milisegundos. Bluetooth Low Energy es AFH (Adaptive Frequency Hopping), es decir, en lugar de saltar frecuencias constantemente a una tasa fija (como en FHSS), este evalúa los canales y evita aquellos con interferencia (por ejemplo, los ocupados por Wi-Fi). Solo salta entre los **canales "libres"**, lo que mejora la estabilidad y reduce el consumo. Hay 40 canales de 2MHz. Ejemplo: los relojes inteligentes de hoy en día usan BLE para enviar datos sobre nuestra salud, entrenamiento o localización.

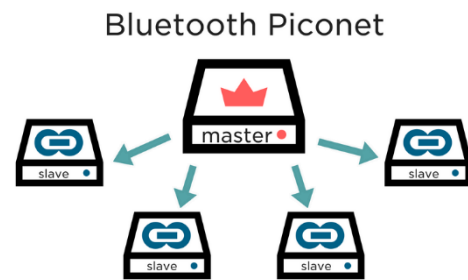
Esquema AFH:



Ambos estándares (Classic y BLE) funcionan con la banda ISM de 2,4 GHz de frecuencia.

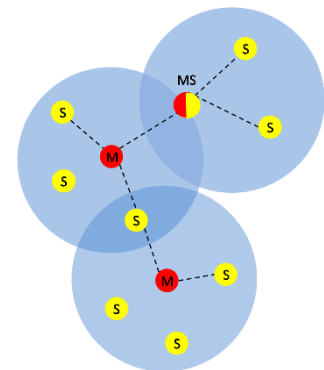
Topología de red Bluetooth

Piconet [3]: Es la unidad básica de una red Bluetooth. Esta se forma cuando un dispositivo actúa como maestro y se conecta con uno o más esclavos (hasta 7 activos simultáneamente como mucho). Todos los dispositivos comparten el mismo reloj y canal de frecuencia del maestro. Es una red pequeña, temporal y de corto alcance (WPAN). La AM_ADDR (Active Member Address) de Bluetooth representa una dirección que se utiliza para distinguir entre los miembros activos que participan en una piconet. El maestro asigna a cada esclavo activo una dirección temporal de 3 bits. Cualquier paquete intercambiado entre el maestro y un esclavo activo llevará la AM_ADDR asociada. La AM_ADDR se utiliza tanto para paquetes de maestro a esclavo como para paquetes de esclavo a maestro. El maestro utiliza la dirección de ceros (000) para la difusión de paquetes. [5]



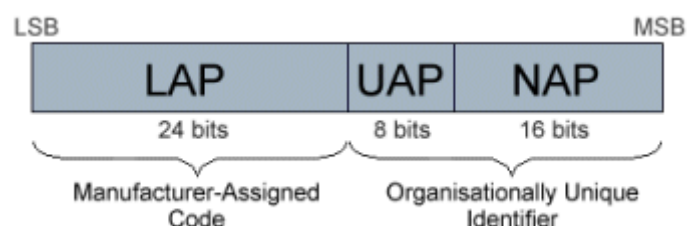
Ejemplo: Tu móvil conectado a unos auriculares Bluetooth y a un smartwatch → es una piconet. El móvil sería el maestro y los auriculares y el reloj los esclavos.

Scatternet [3]: Es una red formada por varias piconets interconectadas. Un dispositivo puede participar en más de una piconet, actuando como maestro en una y esclavo en otra, funcionando como "puente". También puede ser esclavo o maestro en ambas. Esto permite ampliar la red más allá del límite de una sola piconet.



La dirección de dispositivo Bluetooth de 48 bits (BD_ADDR) es esencialmente una dirección MAC globalmente única asignada a cada adaptador Bluetooth por el fabricante del dispositivo y se puede dividir en tres campos [6]:

- **Parte inferior de la dirección (LAP):** la porción de 24 bits de la dirección MAC asignada por el fabricante y que forma parte del código de acceso que precede al encabezado de banda base Bluetooth en los paquetes transmitidos.
- **Parte superior de la dirección (UAP):** una porción de 8 bits del identificador único organizativo (OUI) de 24 bits de la dirección MAC asignado a los fabricantes por el IEEE. El UAP se utiliza, entre otras cosas, para generar el campo de corrección de errores de encabezado (HEC), que se utiliza para detectar errores en los paquetes Bluetooth.
- **Parte no significativa de la dirección (NAP):** los 16 bits restantes del OUI. El NAP no es particularmente significativo para las redes Bluetooth.



Ejemplo:

Piconet 1 → Maestro: Tu móvil. **Esclavos:** Smartwatch y auriculares.

Piconet 2 → Maestro: Smartwatch. **Esclavo:** Báscula inteligente.

En este caso el smartwatch sería esclavo en la piconet 1 y maestro en la 2, formando así una Scatternet.

Versiones de Bluetooth sin BLE

Versión	Año de lanzamiento	Rango de transmisión máximo	rango máximo
Bluetooth 1.0	1999	732.2 kbit / s	10 metro (33 pie)
Bluetooth 1.1	2001	732.2 kbit / s	10 metro (33 pie)
Bluetooth 1.2	2003	1 Mbps	10 metro (33 pie)
Bluetooth 2.0	2004	2.1 Mbps	30 metro (100 pie)
Bluetooth 2.1	2007	2.1 Mbps	30 metro (100 pie)
Bluetooth 3.0	2009	24 Mbps	30 metro (100 pie)

En julio de 1999, el grupo Bluetooth SIG presentó oficialmente la especificación **Bluetooth 1.0**, marcando un paso importante hacia la comercialización de esta tecnología. Esta primera versión estaba orientada a establecer **conexiones inalámbricas punto a punto**, con el objetivo principal de facilitar la comunicación entre dispositivos móviles, computadoras personales y periféricos, como por ejemplo entre un teléfono móvil y unos auriculares.

Bluetooth 1.0 definía las características fundamentales del estándar, sin embargo, **no incluía instrucciones suficientemente detalladas para su implementación práctica**. Esta falta de claridad provocó problemas de **interoperabilidad**, ya que los dispositivos de distintos fabricantes no siempre funcionaban correctamente entre sí. Como consecuencia, **Bluetooth 1.0 no logró cumplir con las expectativas iniciales** y su adopción fue limitada dentro del ámbito tecnológico en sus primeras etapas.

Como vemos en Bluetooth 3.0 hay un cambio brusco de velocidad, esto se debió a una extensión de alta velocidad opcional que aprovechaba el estándar IEEE 802.11PAL. (Capa de adaptación de protocolo) para admitir un rendimiento de hasta 24 Mbps – 8x más rápido que el máximo de 3 Mbps de Bluetooth 2.0. [4]

Versiones Bluetooth con BLE

Versión	Año de lanzamiento	Velocidad máxima de transmisión	rango máximo
Bluetooth 4.0	2009	1 Mbps (EL) 3 Mbps (EDR)	60 metro (200 pie)
Bluetooth 4.1	2013	1 Mbps (EL) 3 Mbps (EDR)	60 metro (200 pie)
Bluetooth 4.2	2014	1 Mbps (EL) 3 Mbps (EDR)	60 metro (200 pie)
Bluetooth 5.0	2016	2 Mbps (EL) 50 Mbps (EDR)	240 metro (800 pie)
Bluetooth 5.1	2019	2 Mbps (EL) 50 Mbps (EDR)	240 metro (800 pie)
Bluetooth 5.2	2020	2 Mbps (EL) 50 Mbps (EDR)	240 metro (800 pie)
Bluetooth 5.3	2021	2 Mbps (EL) 50 Mbps (EDR)	240 metro (800 pie)
Bluetooth 5.4	2023	2 Mbps (EL) 50 Mbps (EDR)	240 metro (800 pie)

En la columna de velocidades vemos 2 diferentes para cada versión, siendo EL las de bajo consumo y EDR las de alta velocidad.

En diciembre de 2009 se lanzó Bluetooth 4.0, una versión importante que integró tres modos de funcionamiento en un solo estándar: Bluetooth Clásico, Alta Velocidad y Bluetooth Low Energy (BLE).

El avance más destacado fue la incorporación de BLE, una tecnología diseñada para reducir drásticamente el consumo de energía, ideal para dispositivos IoT. BLE permite que sensores y pequeños dispositivos funcionen durante años con una simple batería tipo botón, gracias a una pila de protocolos optimizada y un modo de bajo consumo. También ofrece baja latencia (aprox. 3 ms), alcance de más de 100 metros, y cifrado AES-128 para mayor seguridad.

Mientras tanto, el modo de Alta Velocidad utilizaba radios Wi-Fi (802.11) para transmisiones rápidas, y Bluetooth Clásico se mantenía para garantizar compatibilidad con versiones anteriores.

Esta combinación de modos permitió que Bluetooth 4.0 se adaptara a distintos usos: BLE para IoT de bajo consumo, Alta Velocidad para transferencia de datos, y Clásico para funciones como el audio inalámbrico o la conexión de periféricos.

Ventajas y desventajas del Bluetooth

Las ventajas son [5] [8]:

1. Conectividad inalámbrica fácil

- 1.1. Permite emparejar dispositivos sin cables.
- 1.2. Ideal para periféricos como teclados, auriculares, altavoces, relojes, etc.

2. Bajo consumo energético (especialmente en BLE)

- 2.1. Perfecto para dispositivos IoT o wearables que funcionan con batería por largo tiempo.

3. Operación en banda libre (2.4 GHz)

3.1. No requiere licencias ni infraestructura de red adicional.

4. Seguridad básica incorporada

4.1. Usa cifrado, autenticación y protocolos como SSP (Secure Simple Pairing).

5. Estándar global

5.1. Alta compatibilidad entre dispositivos de diferentes marcas y fabricantes.

6. Bajo costo

6.1. Módulos Bluetooth son económicos y fáciles de integrar en hardware.

Las desventajas son [5] [8]:

1. Alcance limitado

1.1. Clásico: ~10 metros (clase 2)

1.2. BLE: hasta ~240 metros (solo en condiciones ideales)

2. Velocidades bajas comparadas con Wi-Fi

2.1. No apto para grandes transferencias de datos (como videos o archivos pesados).

3. Interferencias

3.1. Opera en la misma banda que Wi-Fi y otros dispositivos → puede haber colisiones si no se gestiona bien el canal.

4. Conexiones limitadas

4.1. En Bluetooth clásico, solo 7 esclavos activos por piconet.

4.2. En BLE puede escalar más, pero depende del diseño.

5. Problemas de emparejamiento

5.1. A veces la conexión falla o requiere reiniciar los dispositivos.

6. Compatibilidad baja entre versiones

6.1. Un reloj inteligente con Bluetooth 4.0 (solo BLE) no puede conectarse a un altavoz con Bluetooth 2.1, ya que el altavoz utiliza Bluetooth Classic y el reloj no soporta ese modo.

Zigbee

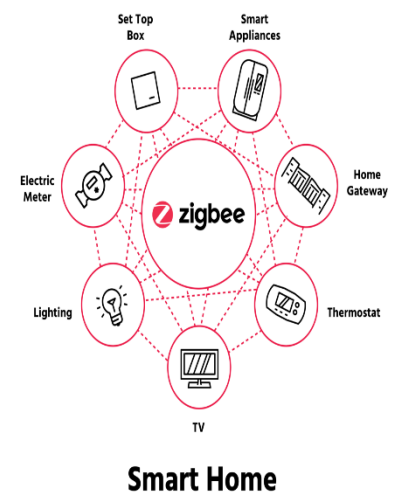
¿Qué es Zigbee? [10]

Zigbee es una especificación de protocolos de comunicación inalámbrica de alto nivel, diseñada para aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías. Está basada en el estándar IEEE 802.15.4 para redes inalámbricas de área personal (WPAN).



Características principales [10]

1. **Bajo consumo energético:** Zigbee está diseñado para maximizar la duración de las baterías, lo que lo hace ideal para dispositivos que requieren operar durante largos períodos sin necesidad de recarga.
2. **Fácil integración:** Los nodos pueden fabricarse con muy poca electrónica, facilitando su incorporación en diversos dispositivos.
3. **Velocidad de transmisión:** Ofrece una velocidad de hasta 250 kbps, adecuada para aplicaciones que no requieren altas tasas de datos.
4. **Capacidad de red:** Una red Zigbee puede constar de hasta 65.535 nodos, distribuidos en subredes de 255 nodos.
5. **Seguridad en la comunicación:** Zigbee proporciona comunicaciones seguras mediante el uso de cifrado, protegiendo la integridad y confidencialidad de los datos transmitidos.
6. **Aplicaciones ideales:** Es especialmente adecuado para domótica, sensores, automatización industrial y sistemas de monitoreo, donde se requiere una comunicación eficiente y de bajo consumo.



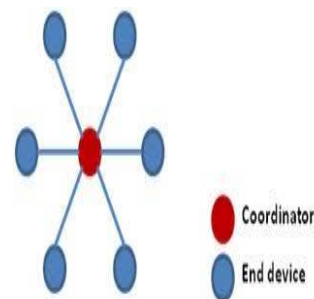
Dispositivos Zigbee

1. Coordinador Zigbee (Zigbee Coordinator, ZC) [9][10] :
 - Función: Es el dispositivo central y más completo de la red. Su principal responsabilidad es iniciar y gestionar la red, controlar el tráfico de datos y almacenar información sobre la topología y las claves de seguridad. Además, puede actuar como puente hacia otras redes.
 - Cantidad en la red: Solo puede haber un coordinador por cada red Zigbee.

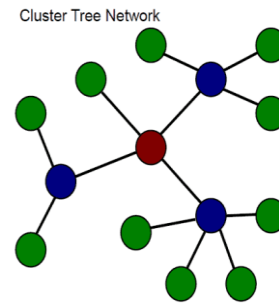
- Ejemplo: Un hub domótico es un dispositivo que conecta y coordina todos los sensores y aparatos inteligentes de una casa, para que puedan comunicarse entre sí. Ejemplo: Amazon Echo Hub con Alexa
2. Router Zigbee (Zigbee Router, ZR) [9][10]:
- Función: Actúa como un dispositivo intermedio que facilita la comunicación entre dispositivos, extendiendo el alcance de la red al retransmitir datos.
 - Cantidad en la red: Puede haber múltiples routers en una red, lo que mejora la cobertura y la robustez de la comunicación.
 - Ejemplo: Un enchufe inteligente que retransmite señales a otros dispositivos Zigbee en el hogar. Ejemplo: SONOFF S40 Lite 15A
3. Dispositivo Final Zigbee (Zigbee End Device, ZED) [9][10]:
- Función: Son dispositivos con funcionalidades limitadas que se comunican únicamente con su nodo padre. No retransmiten datos de otros dispositivos, lo que les permite entrar en modos de bajo consumo y prolongar la vida útil de sus baterías.
 - Cantidad en la red: Pueden existir numerosos dispositivos finales en la red, ya que son los elementos que interactúan directamente con el entorno.
 - Ejemplo: Un sensor de temperatura que envía lecturas periódicas al coordinador o router para monitorear el clima en una habitación. Ejemplo: SONOFF SNZB-02D

Topología de red Zigbee

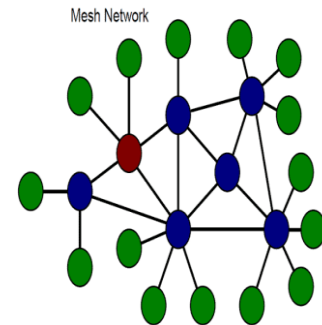
1. **Topología en estrella:** Esta configuración está formada por un coordinador central que se comunica directamente con múltiples dispositivos finales. En esta configuración no se utilizan los routers. Los dispositivos finales no se comunican entre sí, sino únicamente con el coordinador, que actúa como el núcleo de la red. Esta estructura es sencilla y es por eso que es muy fácil de gestionar, pero si el coordinador falla, toda la comunicación se verá interrumpida. [9]



2. **Topología en árbol:** En esta topología podemos ver que ya aparecen los routers, que serán los puntos azules. El coordinador central actuará como la raíz del árbol y se conecta a varios de estos enrutadores o dispositivos intermedios, que a su vez se conectan a otros enrutadores o dispositivos finales. Esta estructura permite una red más amplia, pero la comunicación depende de los routers; si uno de ellos falla, los dispositivos conectados a él pueden perder la comunicación. [9]



3. **Topología de malla:** En esta disposición, cada dispositivo puede comunicarse con otros dentro de su alcance, formando una red interconectada donde los datos pueden tomar múltiples rutas para llegar a su destino. Esta topología ofrece alta redundancia y fiabilidad; si un router falla, los datos pueden ser redirigidos a través de otros caminos disponibles, asegurando la continuidad de la comunicación. [9]



Ventajas y desventajas:

Ventajas [14] [15]:

1. **Bajo consumo energético:**
 - Los dispositivos Zigbee pueden funcionar con muy poca energía, lo que les permite operar con baterías durante períodos prolongados. Por ejemplo, un sensor Zigbee puede necesitar cambiar las baterías solo una vez al año o incluso con menos frecuencia.
2. **Topología de red en malla:**
 - Zigbee permite que múltiples dispositivos se comuniquen entre sí y con un coordinador central, sin importar el tamaño de la red. Esto lo hace ideal para aplicaciones de domótica y automatización del hogar.
3. **Fácil integración y escalabilidad:**
 - Gracias a su diseño, Zigbee facilita la integración de nuevos dispositivos en la red, permitiendo una expansión sencilla y eficiente.
4. **Compatibilidad entre dispositivos:**
 - Zigbee permite que dispositivos de distintos fabricantes se comuniquen de forma compatible, lo que brinda flexibilidad al usuario al elegir productos.
5. **Seguridad en la comunicación:**
 - El protocolo Zigbee IoT permite a los dispositivos comunicar datos sin problemas en diversas topologías de red utilizando una energía extremadamente limitada.

Desventajas [12] [13]:

1. Alcance limitado por dispositivo:

- El alcance típico de un dispositivo Zigbee es de hasta 100 metros en interiores, lo que puede ser insuficiente para ciertas aplicaciones sin el uso de routers adicionales.

2. Posibles interferencias:

- Zigbee opera en la banda de 2.4 GHz, compartida con Wi-Fi y Bluetooth, lo que puede provocar interferencias y afectar el rendimiento de la red.

3. Requiere un hub:

- Para la mayoría de las aplicaciones, es necesario un coordinador o hub que gestione la red Zigbee, añadiendo un componente adicional al sistema.

4. Configuración avanzada puede ser compleja:

- Aunque la configuración básica es sencilla, implementar funcionalidades avanzadas puede requerir conocimientos técnicos especializados.

Aplicaciones prácticas de Zigbee [10] [16]

Zigbee es ampliamente utilizado en diversas áreas debido a su bajo consumo energético y capacidad de formar redes de malla. A continuación, se detallan algunas de sus aplicaciones más comunes

1. Domótica

En el ámbito del hogar inteligente, Zigbee permite la automatización y control de dispositivos como:

- **Iluminación inteligente:** bombillas y sistemas de iluminación que pueden ser controlados remotamente.
- **Sistemas de seguridad:** sensores de movimiento, puertas y ventanas que alertan sobre intrusiones.
- **Control de climatización:** termostatos y sensores de temperatura que optimizan el consumo energético.
- **Electrodomésticos inteligentes:** dispositivos que pueden ser monitoreados y controlados a distancia.

2. Automatización industrial

En entornos industriales, Zigbee facilita la supervisión y control de procesos mediante:

- **Monitoreo de maquinaria:** sensores que detectan fallos o necesidades de mantenimiento.
- **Control de procesos:** sistemas que ajustan parámetros en tiempo real para optimizar la producción.

- **Gestión de energía:** monitoreo del consumo energético para identificar áreas de mejora.

3. Redes de sensores inalámbricos

Zigbee es ideal para implementar redes de sensores que recopilan datos en tiempo real, tales como:

- **Monitoreo ambiental:** sensores de humedad, temperatura y calidad del aire.
- **Detección de incendios:** sensores de humo que alertan sobre posibles fuegos.
- **Sistemas de riego inteligente:** sensores de humedad del suelo que optimizan el uso del agua.

4. Automatización de edificios

En edificios comerciales y públicos, Zigbee permite:

- **Control de iluminación y climatización:** sistemas que ajustan automáticamente según la ocupación y condiciones ambientales.
- **Gestión de accesos:** control de entradas y salidas mediante dispositivos inteligentes.
- **Monitoreo de consumo energético:** análisis en tiempo real para mejorar la eficiencia energética.

Comparación y conclusión

Comparación técnica: Bluetooth vs Zigbee

Además, la interoperabilidad de Bluetooth es una de sus mayores ventajas. Al ser un estándar global adoptado por prácticamente todos los fabricantes de móviles y periféricos, se garantiza una compatibilidad casi universal entre dispositivos. Por otro lado, Zigbee, aunque no tan extendido en dispositivos de consumo, es clave en sectores como la automatización del hogar y la industria, donde su bajo consumo y topologías resistentes lo hacen ideal para redes robustas y autoorganizadas.

Bluetooth y Zigbee son tecnologías WPAN definidas bajo el estándar IEEE 802.15.1 y 802.15.4 respectivamente [20]. Mientras que Bluetooth fue inicialmente diseñado para conexiones personales a corta distancia, Zigbee se orientó hacia redes con muchos dispositivos de bajo consumo [10].

Cabe destacar que Zigbee está especialmente diseñado para trabajar en condiciones en las que la comunicación puede verse afectada por interferencias. Sus capacidades de reenvío de paquetes y autorreparación en topologías de malla permiten mantener la comunicación incluso cuando un nodo falla o desaparece de la red temporalmente.

Bluetooth opera en la banda ISM de 2.4 GHz y utiliza técnicas como FHSS (Frecuencia de Salto) y TDD. Su velocidad puede alcanzar hasta 3 Mbps en Bluetooth Classic, mientras que BLE, orientado al bajo consumo, ofrece menor velocidad pero más eficiencia energética [4]. La topología de red más común es la piconet, con un maestro y hasta 7 esclavos activos [3].

Zigbee también trabaja sobre la banda de 2.4 GHz, pero además permite otras frecuencias como 868 MHz y 915 MHz. Su velocidad es de 250 kbps, y su gran ventaja es el bajo consumo energético, permitiendo que sensores funcionen durante años con una batería pequeña [16]. Zigbee utiliza topologías como estrella, árbol y malla, esta última muy útil para mantener la comunicación incluso si un nodo intermedio falla [10].

En escenarios médicos, BLE permite monitorizar signos vitales en tiempo real sin agotar la batería de sensores portátiles. En deportes y fitness, los dispositivos BLE recolectan y envían datos al teléfono móvil con eficiencia. Además, el desarrollo de dispositivos vestibles y accesorios para mascotas también se apoya en esta tecnología por su bajo consumo y facilidad de integración.

Características	Bluetooth	Zigbee
Frecuencia	2.4 GHz	2.4 GHz ó 868 / 915 MHz
Velocidad	Hasta 3 Mbps	Hasta 250 Kbps
Alcance	10 – 100	10 – 100 m (extensible)
Topología	Piconet, Scatternet	Estrella, Árbol, Malla
Consumo	Bajo (BLE)	Muy bajo
Nodos soportados	~8 por piconet	Miles
Casos comunes	Audio, móviles	Sensores, automatización

¿Cuándo usar cada tecnología?

En entornos industriales, Zigbee permite la creación de redes de sensores distribuidos que pueden recopilar información ambiental, controlar procesos o detectar fallos en maquinaria, todo ello con un mantenimiento mínimo gracias a su eficiencia energética. En la agricultura inteligente, Zigbee es una de las tecnologías preferidas para el despliegue de sensores de humedad, temperatura y riego, ayudando a optimizar el uso del agua y aumentar la productividad del cultivo.

Bluetooth es ideal en escenarios donde se necesita conectar pocos dispositivos con rapidez, como por ejemplo: auriculares, relojes inteligentes, teclados o controles. Es muy común en

dispositivos móviles debido a su compatibilidad universal [2]. BLE (Bluetooth Low Energy) se usa hoy en día para wearables y sensores que envían datos de salud, localización o actividad física [3].

Zigbee es más adecuado en entornos donde hay una gran cantidad de nodos que deben comunicarse entre sí, y donde el consumo energético debe ser mínimo. Por ejemplo, en sistemas de automatización del hogar, agricultura inteligente o automatización industrial. Zigbee permite la integración sencilla y escalable de sensores y actuadores de distintas marcas gracias a su compatibilidad[14], [15].

BLE 5.0 también introduce modos de difusión mejorados que permiten a un dispositivo enviar información a varios otros sin establecer una conexión directa, lo que ahorra energía y mejora el rendimiento en redes con muchos nodos.

Tendencias emergentes en WPAN

Thread es especialmente interesante porque se basa en estándares abiertos y permite que dispositivos de diferentes fabricantes se comuniquen sin necesidad de una nube o servidor externo, lo que incrementa la privacidad, reduce la latencia y mejora la resiliencia de la red local.

El futuro de las WPAN está siendo modelado por nuevas tecnologías como BLE 5.0, Thread y Matter. BLE 5.0 mejora considerablemente el alcance (hasta 240 metros en condiciones ideales), la estabilidad y el consumo energético. Esto lo convierte en una opción poderosa para el IoT [4].

Matter no reemplaza a Zigbee ni a Bluetooth, sino que los complementa. Su función es servir como lenguaje común para que dispositivos que usen tecnologías distintas puedan entenderse entre sí. Esto facilita, por ejemplo, que un asistente de voz que utiliza BLE pueda controlar una bombilla que opera bajo Zigbee, siempre que ambos sean compatibles con Matter.

Thread es una tecnología basada también en IEEE 802.15.4, al igual que Zigbee, pero permite redes malladas con IPv6 nativo, ideal para el hogar inteligente. Fue diseñado por la Thread Group y es altamente seguro, escalable y autorreparable [20].

Matter es una capa de aplicación universal que busca unificar la comunicación entre dispositivos Zigbee, Thread, BLE y Wi-Fi. Promovido por Apple, Google, Amazon y otros grandes del sector, Matter permite una interoperabilidad real entre dispositivos, sin importar el fabricante [14], [10].

La coexistencia de tecnologías como Zigbee y Bluetooth demuestra que no hay una única solución ideal para todos los casos, sino que la elección debe basarse en criterios técnicos como consumo energético, alcance, velocidad de transmisión y tipo de red. A medida que el número de dispositivos IoT crece, las WPAN seguirán siendo esenciales para asegurar una conectividad inteligente y escalable.

Conclusión

La evolución de las redes WPAN y su integración en el ecosistema del Internet de las Cosas ha supuesto un cambio significativo en la forma en que interactuamos con la tecnología en nuestra vida cotidiana. Tecnologías como Bluetooth y Zigbee, aunque diferentes en su arquitectura y propósito, han demostrado ser herramientas clave en la construcción de entornos inteligentes, interconectados y energéticamente eficientes.

Bluetooth ha demostrado su utilidad en la comunicación entre dispositivos de consumo, brindando soluciones versátiles y compatibles con una amplia gama de productos. Su adopción masiva en teléfonos móviles, computadoras portátiles y dispositivos de audio ha consolidado su posición como estándar universal en comunicaciones personales. Por su parte, Zigbee ha liderado en redes de sensores distribuidos, domótica y automatización industrial, gracias a su bajo consumo energético, facilidad de integración y capacidad de operar en topologías de red resilientes.

El desarrollo de tecnologías como Bluetooth Low Energy 5.0 (BLE 5.0) ha elevado a Bluetooth a nuevas posibilidades dentro del IoT, extendiendo su alcance, reduciendo su consumo energético aún más y permitiendo nuevos modos de comunicación, como la difusión sin conexión directa. Por otro lado, iniciativas como Thread han permitido que tecnologías basadas en IEEE 802.15.4 ofrezcan conectividad basada en IP, nativa y segura, ideal para ecosistemas descentralizados. Finalmente, Matter representa una revolución en la interoperabilidad, integrando Zigbee, Thread y Bluetooth bajo un mismo protocolo de aplicación abierto, estableciendo una verdadera comunicación universal entre dispositivos inteligentes.

En definitiva, las WPAN seguirán evolucionando no solo como soluciones de conectividad, sino como pilares fundamentales para el desarrollo de ciudades inteligentes, agricultura de precisión, monitoreo de salud en tiempo real, hogares automatizados, y muchas otras aplicaciones del IoT. Comprender las fortalezas y limitaciones de cada tecnología es clave para su implementación efectiva. A medida que se amplía el ecosistema de dispositivos conectados, tecnologías como Bluetooth, Zigbee, Thread y Matter jugarán un papel crucial en definir cómo será nuestra relación con la tecnología del futuro.

Bibliografía

- [1] <https://www.gacetaholandesa.com/jaap-haartsen-padre-de-bluetooth/#:~:text=Jaap%20Haartsen%20est%C3%A1%20considerado%20el,voz%20y%20datos%20por%20radiofrecuencia> accedido 16-04-2025
- [2] <https://www.intel.la/content/www/xl/es/products/docs/wireless/what-is-bluetooth.html> accedido 21-03-2025
- [3] <https://www.geeknetic.es/Guia/72/Bluetooth-El-Futuro-de-las-Comunicaciones-I.html> accedido 21-03-2025
- [4] <https://www.mokosmart.com/es/guide-on-different-bluetooth-versions/> accedido 23-03-2025
- [5] <https://lenguamaternaone.home.blog/2019/04/02/ficha-3-ventajas-y-desventajas-del-bluetooth/> accedido 23-03-2025
- [6] [https://www.mpirical.com/glossary/am_addr-active-member-address#:~:text=The%20Bluetooth%20AM_ADDR%20\(Active%20Member,slave%20a%20temporary%203bit%20address](https://www.mpirical.com/glossary/am_addr-active-member-address#:~:text=The%20Bluetooth%20AM_ADDR%20(Active%20Member,slave%20a%20temporary%203bit%20address) accedido 15-04-2025
- [7] <https://www.technologyuk.net/telecommunications/communication-technologies/bluetooth.shtml> accedido 15-04-2025
- [8] <https://es.feasycom.net/info/advantages-and-disadvantages-of-bluetooth-tech-58522869.html> accedido 18-04-2025
- [9] <https://eu.aqara.com/es-eu/blogs/noticias/que-es-zigbee-y-como-funciona> accedido 21-03-2025
- [10] <https://en.wikipedia.org/wiki/Zigbee> accedido 22-03-2025
- [11] https://www.logicbus.com.mx/wireless_convertidores accedido 22-03-2025
- [12] <https://www.linkedin.com/advice/3/how-secure-zigbee-z-wave-home-automation-skills-home-automation?lang=es> accedido 23-03-2025
- [13] <https://internetdelascosas.xyz/articulo.php?id=1835&titulo=Que-es-mas-recomendable-LoRa-o-zigbee-Estas-son-las-ventajas-y-las-desventajas> accedido 23-03-2025
- [14] <https://mbservices.cl/zigbee-la-solucion-para-redes-iot-certificacion/> accedido 23-03-2025
- [15] <https://es.digi.com/solutions/by-technology/zigbee-wireless-standard#advantages-zigbee-3-0> accedido 25-03-2025
- [16] <https://www.xmarthome.cl/que-es-un-sensor-zigbee?> accedido 15-04-2025
- [17] <https://www.redeszone.net/tutoriales/redes-wifi/que-es-estandar-wpan/> accedido 31-03-2025

- [18] <https://redesinformaticas.org/red-wpan/> accedido 20-04-2025
- [19] <https://es.wikipedia.org/wiki/WPAN> accedido 21-04-2025
- [20] https://es.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15 accedido 23-04-2025