

ANÁLISIS COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS BLUETOOTH, WIFI, ZIGBEE Y LORA CON UN ENFOQUE EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE MALLA.

Rentería Manjarrez Rigoberto, Ortiz Carrasco Ciriaco, Gaxiola Sánchez Omar Ivan.
Tecnológico Nacional de México Campus Culiacán – Instituto Tecnológico de Culiacán
Departamento de Posgrado e Investigación
Juan de Dios Bátis No. 310 Pte., Col. Guadalupe, C.P. 80220 Culiacán Rosales, Sin.
m12170529@culiacan.tecnm.mx

RESUMEN.

Este trabajo de investigación tiene como objetivo realizar un análisis comparativo exhaustivo de las tecnologías Bluetooth, WiFi, ZigBee y LoRa. El estudio de las tecnologías está basado en sus estándares y en investigaciones técnicas realizadas en trabajos previos, en donde se evaluaron las soluciones mediante parámetros como: topología, tasa de transferencia, frecuencia, cobertura, tamaño de la red, modulación, trama de datos y duración de batería. La investigación se realiza con la premisa de elegir la mejor alternativa de red inalámbrica para un sistema conformado por varios nodos comunicados entre sí, donde cada uno se encarga del monitoreo y control de temperatura, pH y oxígeno disuelto del agua en una granja acuícola. De esta comparación se determinó que la mejor alternativa para la implementación de una red inalámbrica para el objetivo planteado es una red ZigBee. Adicionalmente, se realiza una recomendación de aplicaciones para cada una de las tecnologías inalámbricas analizadas.

Palabras clave: Bluetooth, WiFi, ZigBee, LoRa, red de malla.

ABSTRACT.

This research work is to carry out an exhaustive comparative analysis of Bluetooth, WiFi, ZigBee and LoRa technologies. The study is based on their standards and on technical research performed in previous work, where the solutions were evaluated using parameters such as: topology, transfer rate, frequency, coverage, network size, modulation, data package and duration of battery. The research is accomplished with the premise of choosing the best wireless network alternative for a system conformed by many nodes intercommunicated, where each one realizes the monitoring and control of temperature, pH and dissolved oxygen of water in the aquaculture farm. From this comparison, it was determined that the best alternative for implementation within a wireless network for the stated objective is a ZigBee network. Additionally, a recommendation of applications is made for each of the wireless technologies analyzed.

Keywords: Bluetooth, WiFi, ZigBee, LoRa, Mesh network.

1. INTRODUCCIÓN

Con el avance tecnológico de las comunicaciones se han creado nuevas necesidades de conectividad y acceso a cada vez más dispositivos. Dentro de las novedades se encuentran las conexiones inalámbricas que nos ofrecen ventajas en el ámbito tecnológico con costos más accesibles. En este campo el sector se interesa por la interoperabilidad, la compatibilidad entre distintos tipos de dispositivos y la escalabilidad de redes,

basándonos en la eficiencia para que el sistema cuente con seguridad, movilidad y configuración adecuada.

Las tecnologías inalámbricas se definen en cuatro categorías dependiendo del rango de alcance que tienen, estas son, Wireless Personal Area Network (WPAN), son las que se utilizan para operar un área personal, de corto alcance. La Wireless Local Area Network (WLAN) diseñada para interconectar equipos dentro de edificios a media distancia. Wireless Metropolitan Area Network (WMAN) para áreas extensas y redes inalámbricas de área amplia (Wireless Wide-Area Networks - WWAN) [1]. En la Figura 1, se muestra la clasificación de estas redes [2].

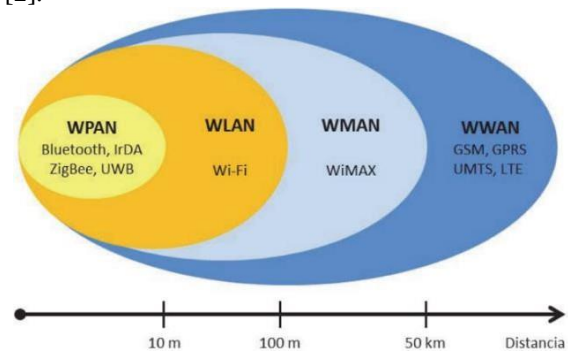


Figura 1. Clasificación de las redes inalámbricas [2].

Dentro de las principales tecnologías inalámbricas que existen en el mercado se encuentran Bluetooth, WiFi, ZigBee y LoRa, cada uno con características y propiedades diferentes, diseñadas para usos específicos. En la Figura 2 se muestra una gráfica que incluye estas tecnologías comparando el alcance contra la velocidad de transferencia de datos de cada una.

Estas tecnologías pueden tener diferentes formas de comunicación entre los dispositivos conectados en una red para transmitir datos entre sí y establecer una comunicación, a estos tipos de conexión se les llama topología de red. Las principales son: bus, estrella, árbol, anillo, malla y las combinaciones de estas, ver Figura 3.

Es importante conocer cuales topologías son soportadas por cada estándar inalámbrico, debido a que influye en el flujo de la información, en cómo se controla la red y en la forma en que esta se puede expandir, actualizar y su comportamiento en el consumo de energía. La Figura 3 muestra las diferentes topologías de red.

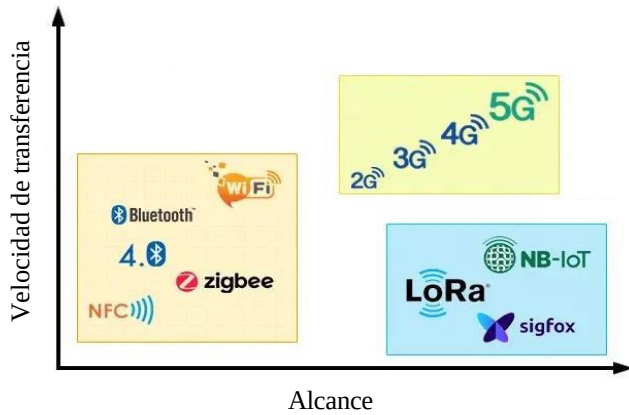


Figura 2. Velocidad de transferencia vs alcance de redes inalámbricas [3].

La red mesh o malla es un tipo de red de comunicación inalámbrica en la que cada dispositivo, nodo o punto en la red está conectado directamente a muchos otros. La ventaja que permite este tipo de comunicación es potenciar la conexión entre los módulos, debido a la cooperación entre los nodos. Para la aplicación que se busca en la granja acuícola se pretende tener una buena comunicación entre los módulos y evitar la pérdida de comunicación. Considerando que la fuente de energía será mediante una batería.

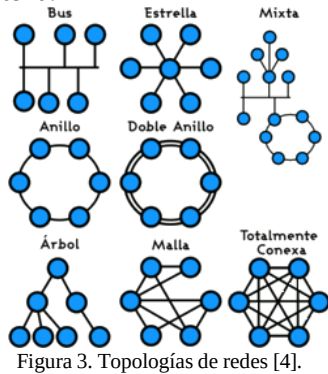


Figura 3. Topologías de redes [4].

La organización de este artículo es la siguiente: la sección 2 explica los protocolos Bluetooth, WiFi, ZigBee y LoRa respectivamente, revisando sus principales características de funcionalidad, topologías de red soportadas, modulación empleada, estructura y contenido de los paquetes de datos. Una tabla comparativa de las cuatro tecnologías y recomendaciones de aplicaciones para cada una de ellas se presenta en la sección 3. Por último, en la sección 4 se dan las conclusiones del trabajo.

2. TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS

La tecnología inalámbrica, es aquella que combina la comunicación sin cables y la interconexión de dispositivos para compartir información sin necesidad de medios físicos, actúa como un puente invisible que conecta dispositivos de manera fluida y sin limitaciones espaciales.

2.1. Bluetooth

Bluetooth es un tipo de tecnología que permite crear redes reducidas de manera inalámbrica para compartir información, basado en el estándar IEEE 802.15.1. Es una de las tecnologías de comunicación inalámbrica utilizada por dispositivos de diferentes tipos, entre los que destacan celulares, tabletas, computadoras, relojes inteligentes, bocinas y muchos otros. A lo largo de la historia ha ido evolucionando para poder combatir sus deficiencias y mejorar sus capacidades, pasando por muchas versiones. La primera versión comercial del Bluetooth fue la 1.0 introducida en 1999, pero tuvo subversiones como la 1.1 y 1.2 las cuales se caracterizaban por comunicación punto a punto, a corta distancia, con una velocidad máxima de 1 Mbps pero tenía problemas de interoperabilidad, por lo cual se desarrolló la versión 2.0 y su variante 2.1 donde se aumentó la velocidad a 3 Mbps, se mejoró el rendimiento, el consumo de batería y la seguridad en la conexión. La tercer gran versión, fue la 3.0 también conocida como high speed, la cual llegaba hasta 24 Mbps. La versión 4.0 se caracterizó por la mejora en el ahorro de energía. En la versión 4.1 se agregó la característica de poder configurarse como maestro o esclavo, mayor velocidad y seguridad. La generación 5.0 tiene la característica de alcanzar distancias de transmisión de hasta 240 metros debido a mayor tamaño de los paquetes, también se agrega la capacidad de detección de ubicaciones de los dispositivos. En el año 2020 se lanzó la versión 5.2 la cual tuvo una mejora en la calidad de audio, posteriormente la versión 5.3 mejora el rendimiento de los canales, la eficiencia energética y la seguridad. Actualmente se encuentra en desarrollo la versión 6.0 que pretende incrementar el ahorro energético y mejorar la tasa de transmisión de datos [5].

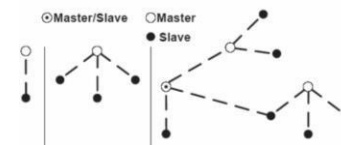


Figura 4. Topologías de una red Bluetooth [5].

El estándar Bluetooth opera en la banda ISB (Independent Side Band) de uso libre. Para evitar interferencias y debilitamiento de la señal utiliza un transceptor diseñado para ejecutar saltos de frecuencia (frequency hopping) en un conjunto amplio de portadoras. El reloj del maestro y su dirección definen el patrón de saltos con cambios aleatorios de 79 frecuencias en la banda ISB, cada uno es único. Bluetooth acepta varias topologías como la piconet donde un maestro controla a uno o varios esclavos, formando conexiones punto a punto, punto a multipunto y estrella; y scannet el cual se compone de varias piconet formando topologías de árbol y con algunas manipulaciones, una red en malla (Figura 4).

La modulación que se utiliza es GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying). Un 1 binario se representa con una desviación positiva de frecuencia, y un 0 binario se representa con una desviación negativa de frecuencia como se muestra en la Figura 5.

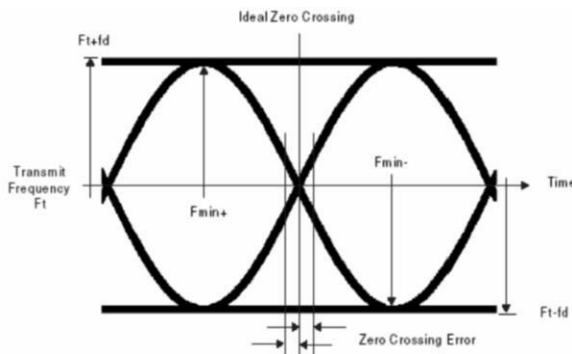


Figura 5. Diagrama de modulación GFSK [5].

El error de cruce por cero es la diferencia de tiempo entre el periodo ideal del símbolo y el tiempo de cruce real y la desviación máxima de frecuencia. El canal se representa por una secuencia aleatoria de salto a través de 79 o 23 canales de RF (Radio Frequency). El canal se divide en rebanadas de tiempo mientras que cada rebanada corresponde a una frecuencia RF de salto. Los datos en el canal se transportan en paquetes, donde cada uno consta de tres partes: el código de acceso, el encabezado, y los datos útiles como se muestra en la Figura 6. Tanto el código de acceso como el encabezado son siempre de un tamaño estándar: 72 bits y 54 bits respectivamente. Los datos útiles pueden variar de cero a un máximo de 2745 bits [5].

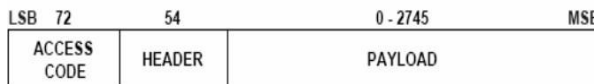


Figura 6. Paquete de datos Bluetooth [5].

Para reducir el consumo de energía, la información en los paquetes se minimiza tanto en el TX y en el RX, esto significa que, si solo se necesita intercambiar información del link de control, se utilizarán paquetes NULL.

El protocolo Bluetooth tiene un gran ahorro de energía, transmisión a distancias de hasta 240 metros, bajo costo, fácil configuración y una de las cosas más importantes, la mayoría de los dispositivos electrónicos cuentan con esta tecnología lo que permite conectarlos entre sí. Por otro lado, una de las cosas que impide utilizar esta tecnología para el sistema de monitoreo y control de la granja acuícola, es que no cuenta con una topología original en malla.

2.2. WiFi

El estándar IEEE 802.11 más conocido como WiFi es una tecnología inalámbrica que permite una conexión a internet mediante ondas de radio. La primera versión de WiFi nació en 1997 con una velocidad máxima de 2 Mbps, a una frecuencia de 2.4 GHz. El WiFi 1 o estándar IEEE 802.11.b tiene mucha mayor velocidad llegando a los 54 Mbps, esto se logró al trabajar en la banda de 5 GHz, pero se perdió potencia de transmisión disminuyendo la distancia. El WiFi 2 con el estándar IEEE 802.11.a, utilizó la misma frecuencia que la primera versión, con lo que se obtuvo una tecnología más barata, con más alcance,

pero su velocidad se redujo a 11 Mbps. El WiFi 3 o estándar IEEE 802.11.g, logró tener la distancia de alcance de la versión b, pero con la velocidad de la versión a. El WiFi 4 o IEEE 802.11.n, aumentó significativamente la velocidad de transmisión llegando hasta 600 Mbps, permitió el uso de la configuración MIMO (Multiple Inputs, Multiple Outputs), es retrocompatible y se puede utilizar en ambas bandas de frecuencia. La versión IEEE 802.11.ac o WiFi 5 tiene velocidades entre 1.3 y 3.5 Gbps, canales más anchos, alcanza mayores distancias y se agregó el uso mu-MIMO (Multiple MIMO). El WiFi 6 o IEEE 802.11.ax, tiene velocidades mayores de hasta casi 10 Gbps, vuelve a utilizar 2 bandas, utiliza otro tipo de modulación llamado OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) y una mejora en el ahorro de energía, como se puede ver en la Figura 7, todos los puntos máximos y mínimos son perpendiculares entre sí [6].

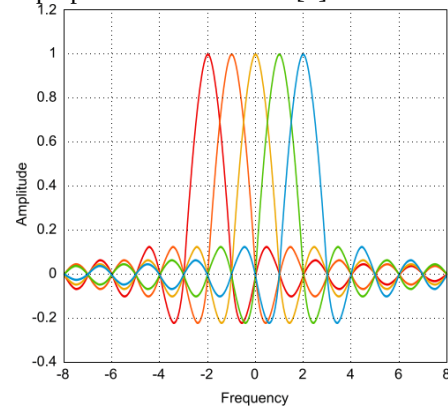


Figura 7. Diagrama de modulación OFDM [6].

La versión original del estándar 802.11 tenía el propósito de proveer tasas de transmisión de 1 a 2 Mbps, para lo cual requería de uso de técnicas de espectro disperso, por lo cual se definieron dos modalidades: Salto en Frecuencia (Frequency-Hopping Spread-Spectrum FHSS) y Esparcimiento en Secuencia Directa (Direct Sequence Spread-Spectrum DSSS), los cuales resultaban incompatibles, por lo cual se crearon 2 grupos de investigación DSSS para alcanzar 11 Mbps en un canal de 20 MHz y OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) con una capa alterna llegando hasta 54 Mbps utilizando la banda de 5 GHz que estaba menos saturada. La característica principal de OFDM es que divide un canal de comunicación en bandas igualmente espaciadas. Una portadora lleva los datos de usuario y es enviada a cada banda, las cuales son ortogonales entre sí, por lo cual puede ser usado sin generar interferencias. Dando ventajas como alta eficiencia espectral, resistencia a interferencias y baja dispersión multitrayectoria, por tales motivos es muy utilizado en las comunicaciones y se considera una técnica excelente contra bajo ruido y degradación de la señal. Dicha técnica permite que la información contenida en cada tono sea modulada usando modulación en fase, amplitud o ambas; por la técnica PSK (Phase Shift Keying) o QAM (Quadrature Amplitud Modulation) [7].

El formato general para la trama MAC ver Figura 8, está compuesto de un grupo de campos en un orden fijo, pero de acuerdo con el tipo de trama, el formato puede variar haciendo desaparecer algunos campos, se tomará en cuenta el siguiente formato.

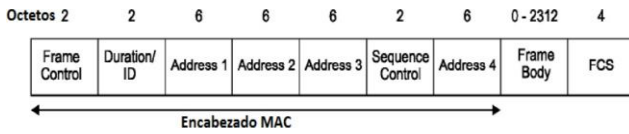


Figura 8. Trama de datos WiFi [7].

La trama se puede dividir en 3 subgrupos, el primero es el encabezado que contiene 4 campos, el frame control, la duración, direcciones desde la 1 a la 4 y el control de secuencia. El cuerpo de la trama está constituido por los datos útiles y el último subgrupo es el frame check sequence (FCS) que le da robustez a la trama es decir es donde se verifica si existe información corrupta o que si llega a su destino.

Las topologías de red que permite este tipo de tecnología son las mostradas en la Figura 3.

Entre las ventajas que tiene el WiFi se encuentran: fácil implementación y uso, compatibilidad con millones de dispositivos, pero su principal característica es la gran velocidad de transmisión, en el caso contrario su principal desventaja es un gran consumo de energía.

2.3. ZigBee

En el año 2000 los grupos de investigación de IEEE y ZigBee Alliance plantearon que era necesario desarrollar una red cuyas características estuvieran orientadas al bajo consumo de recursos, entre estos, la energía y el costo de funcionamiento, desarrollando así el protocolo IEEE 802.15.4 [8].

A lo largo de los años, han surgido diversas versiones de ZigBee, cada una con características y mejoras específicas. La primera versión, ZigBee 1.0, lanzada en 2004, estableció las bases para las aplicaciones de bajo consumo y redes de malla. En 2006, ZigBee 1.1 introdujo mejoras en la interoperabilidad y la seguridad, además de ajustes en la especificación inicial. Esta versión mejoró la gestión de redes y dispositivos, y ofreció una mayor compatibilidad con los dispositivos existentes. ZigBee PRO, también conocido como ZigBee 2007, fue una extensión significativa, ofreció mejoras importantes en la red de malla, seguridad y eficiencia energética. Con soporte para una mayor cantidad de nodos y mejor enrutamiento. En 2014, ZigBee 3.0 unificó todas las versiones anteriores en una única especificación, simplificando el diseño de redes y mejorando la interoperabilidad. Esta versión actualizó la seguridad con soporte para certificados y encriptación más robusta, y optimizó la eficiencia de la red y la gestión de dispositivos. ZigBee 3.1, lanzada en 2016, se centró en mejorar la interoperabilidad y añadir nuevas capacidades para aplicaciones específicas. Promovió una mayor compatibilidad entre dispositivos ZigBee y otros estándares de IoT. Finalmente, ZigBee 3.2, lanzada en

2020, es la versión más reciente y continúa con la unificación y mejora de la especificación ZigBee.

ZigBee utiliza la técnica de modulación Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) con Offset Quadrature Phase Shift Keying (O-QPSK) para transmitir datos en la banda de frecuencia de 2.4 GHz. En las bandas de frecuencia más bajas, como 868 MHz (Europa) y 915 MHz (EE. UU.), ZigBee emplea Binary Phase Shift Keying (BPSK). DSSS expande la señal transmitida en una banda de frecuencia más amplia mediante la multiplicación de los datos con una secuencia de códigos pseudoaleatorios, lo que ofrece varias ventajas: reducción de interferencias al ser menos susceptible a interferencias y ruido, mayor seguridad al añadir un nivel de encriptación a la transmisión, y mayor robustez ante condiciones adversas. O-QPSK, una variante de QPSK, modula los datos cambiando la fase de la portadora en cuatro posibles estados (0, 90, 180 y 270 grados) y desfasa las transiciones en las componentes en fase (I) y en cuadratura (Q) por medio periodo de la señal. Esto suaviza los cambios en la amplitud de la señal modulada, mejorando así la eficiencia de la transmisión y reduciendo errores [9].

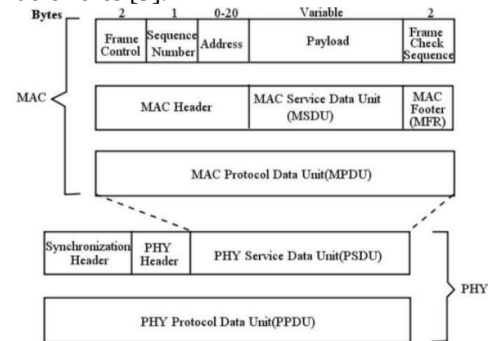


Figura 9. Trama de datos ZigBee [10].

El paquete de datos ZigBee como se ve en la Figura 9 está estructurado en varias capas según el modelo OSI. Comienza con la capa física (PHY), que incluye el preámbulo, el delimitador de inicio de trama (SFD), el encabezado físico (PHR) y la carga útil física (PHY Payload). La capa de enlace de datos (MAC) añade un encabezado MAC con campos de control de trama, número de secuencia y direcciones de origen y destino, seguida por la carga útil MAC y el pie de página (MFR) que contiene la secuencia de verificación de tramas (FCS). La capa de red (NWK) incluye un encabezado con información de enrutamiento como direcciones de red, número de saltos y número de secuencia, seguido por la carga útil de la red.

La capa de soporte de aplicación (APS) agrega un encabezado con información específica de la aplicación como el tipo de mensaje y los identificadores de clúster y perfil, junto con la carga útil APS. Finalmente, la capa de aplicación (APL) contiene los datos específicos de la aplicación. Esta estructura modular permite a ZigBee manejar eficientemente la comunicación en redes de malla, asegurando la integridad y la entrega correcta de los mensajes [10].

Las topologías soportadas por ZigBee son las mostradas en la Figura 3. Este protocolo ofrece numerosas ventajas, incluyendo bajo consumo de energía, alta seguridad, y la capacidad de formar redes de malla robustas que aseguran la fiabilidad y cobertura en áreas extensas. Su capacidad para soportar un gran número de nodos (hasta 65535) en una red también permite una escalabilidad significativa, adaptándose a diversas necesidades en el Internet de las Cosas (IoT).

2.4. LoRa

Es una técnica de capa física utilizada para crear canales de comunicación de largo alcance para topologías WAN. Sus principales características son la operación a grandes distancias, un bajo consumo de potencia y la operación en bandas ISM.

La tecnología LoRa en sí no tiene "versiones" en el sentido tradicional de actualizaciones de software o hardware como se ve en otras tecnologías; se refiere a una técnica de modulación de espectro expandido utilizada en la comunicación de datos a larga distancia con bajo consumo de energía, propiedad de Semtech Corporation. Sin embargo, las implementaciones de LoRa en diferentes aplicaciones y entornos pueden variar dependiendo de varios factores como la frecuencia de operación, el diseño de los dispositivos y la infraestructura de red.

LoRa es una técnica de modulación de espectro ensanchado basada en Chirp Spread Spectrum (CSS), desarrollada por Semtech. Se implementa en la capa física de la arquitectura de red, lo que permite adaptarse a conexiones robustas. La modulación CSS utiliza pulsos chirp de frecuencia lineal de banda ancha para codificar información, transmitiendo la señal en ráfagas que saltan entre frecuencias en una secuencia pseudoaleatoria. Un chirp es un tono cuya frecuencia aumenta (up-chirp) o disminuye (down-chirp) con el tiempo, con un ancho de banda equivalente al de la señal espectral como se observa en la Figura 10. Esta técnica proporciona alta resistencia a interferencias y permite la comunicación a largas distancias con bajo consumo de energía, lo que la hace ideal para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) [11].

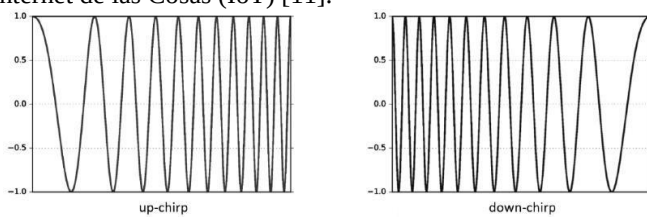


Figura 10. Chirp en la modulación [11].

El paquete de datos de LoRa está estructurado en varias capas siguiendo el modelo OSI, permitiendo una transmisión eficiente y segura. En la capa física (PHY), el paquete comienza con un preámbulo de chirps para sincronizar el receptor con el transmisor, seguido por una palabra de sincronización (Sync Word) que distingue las redes LoRa. A continuación, el encabezado físico (PHDR) proporciona información sobre el tamaño de la carga útil (payload) y la presencia de un CRC para la verificación de errores. La carga útil contiene los datos reales

transmitidos y se finaliza con un CRC para asegurar la integridad de los datos [12].

LoRa soporta topologías de estrella y punto a multipunto, donde los dispositivos se comunican directamente con una estación base central. Esto permite una comunicación eficiente y de largo alcance.

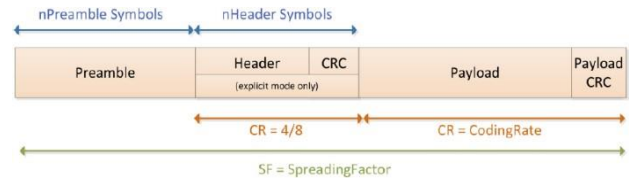


Figura 11. Trama de datos LoRa [12].

LoRa proporciona ventajas significativas, como su capacidad para comunicarse a largas distancias con un bajo consumo de energía. Su tecnología de modulación robusta asegura la fiabilidad de la transmisión de datos en entornos difíciles, mientras que su capacidad para soportar una alta densidad de dispositivos y cobertura amplia facilita la implementación de redes extensas y eficientes.

3. COMPARATIVA DE LAS CUATRO TECNOLOGÍAS

La tabla 1 proporciona una comparación concisa de las características clave de cada tecnología, facilitando la selección de la tecnología inalámbrica más adecuada para las necesidades específicas de cada proyecto o aplicación. Considerar factores como alcance, consumo de energía, velocidad de datos, topología de red requerida y presupuesto es crucial para tomar una decisión informada.

Bluetooth es una tecnología inalámbrica diseñada para facilitar la comunicación de corto alcance entre dispositivos móviles y periféricos como auriculares y teclados, destacándose por su bajo consumo de energía, ideal para dispositivos con baterías de larga duración como wearables y dispositivos IoT de bajo consumo. Sin embargo, su velocidad de transferencia de datos es inferior a la de WiFi, limitando su utilidad en aplicaciones que requieren la transmisión rápida de grandes volúmenes de información, y su alcance efectivo está restringido a distancias relativamente cortas. Por otro lado, WiFi ofrece alta velocidad de transferencia de datos y conectividad a internet de alta velocidad en entornos empresariales, industriales y domésticos, siendo ideal para redes locales donde se necesita compartir grandes cantidades de datos rápidamente, aunque su consumo de energía relativamente alto puede ser una desventaja en dispositivos que deben operar con baterías durante períodos prolongados.

En cuanto a la topología de redes, WiFi soporta todas las mostradas en la Figura 3, mientras que Bluetooth soporta las mostradas en la Figura 4. En este sentido, ZigBee se destaca por formar redes de malla autoorganizadas, permitiendo a los dispositivos adaptarse a cambios en la topología de la red sin intervención manual, ideal para aplicaciones de IoT como monitoreo ambiental y automatización industrial, aunque su

Tabla 1. Comparativo tecnologías inalámbricas.

	Bluetooth v5.0	Wi-fi 6	Zigbee	LoRa
Fecha introducción	2022	2020	2023	2021
Frecuencia	2,4 GHz	2,4 GHz, 5 GHz	2,4 GHz, 868 MHz, 915 MHz	863-870 MHz en Europa, 902-928 MHz En America, 433 MHz en Asia
Protocolo IEEE	IEEE 802.15.1	IEEE 802.11ax	IEEE 802.15.4	LoRa
Alcance	Hasta 240 metros (exterior) y 60 m (interior).	Hasta 250 m (exterior) y 70 m (interior)	Hasta 1600 m (exterior), y 90 m (interior)	Hasta 20 Km (rural) y 5 Km (urbano)
Potencia de transmisión	20 y 30 dBm (100 mW).	20 y 30 dBm (80-500 mW)	0 - 20 dBm (0,05-1 mW)	10 y 27 dBm (10-20 mW)
Consumo de corriente Modo TX Modo reposo	Transmisión (BLE): Aproximadamente 3-10 mA Modo inactivo (BLE): Generalmente en el rango de microamperios, como 1-50 µA.	Transmisión: Aproximadamente 300-500 mA. Modo inactivo: Aproximadamente 100-200 mA.	Transmisión: Aproximadamente 40-50 mA. Modo inactivo (sleep): Menos de 1 mA (generalmente en el rango de microamperios, como 10-100 µA).	Transmisión: Alta potencia (20 dBm) Aproximadamente 120-150 mA. Media potencia (14 dBm) Aproximadamente 40-70 mA Baja potencia (10 dBm) Aproximadamente 20-30 mA. Modo de suspensión profunda: Menos de 1 µA.
Tasa de transmisión	2 Mbps	10 Gbps	250 kbps	50 kbps
Tamaño del paquete de datos	27 - 251 bytes	200 - 1500 bytes	127 bytes	256 bytes
Tiempo de conexión a una red o enlace a un dispositivo	Medio	Medio	Rápido	Lento
Modulación	GFSK	1024-QAM, OFDM	O-QPSK y BPSK	CSS
Número de nodos aceptados	Hasta 7	Hasta 255	Hasta 65535	NA
Número de canales	40	40	16	NA
Fortalezas	Bajo consumo de energía, fácil uso, alta seguridad, bajo costo	Alta velocidad de datos, gran ancho de banda	Bajo consumo de energía, red en malla, ideal para escalabilidad	Largo alcance, bajo consumo de energía, penetración en paredes
Topología de red soportada	Punto a punto, punto a multipunto, estrella	Punto a punto, punto a multipunto, malla	Red en malla, estrella, árbol	Punto a punto, punto a multipunto, estrella

velocidad de transferencia de datos es más lenta que la de Bluetooth y WiFi. En contraste, LoRa es ideal para aplicaciones que requieren comunicación entre dos dispositivos (punto-punto) a largas distancias y eficiencia energética, como sistemas de monitoreo agrícola y gestión de activos, gracias a su capacidad para operar con baterías durante períodos prolongados, pero su velocidad de datos es considerablemente más lenta que la de las otras tecnologías inalámbricas analizadas, limitando su aplicación en escenarios que necesitan transmisiones rápidas y continuas de datos.

4. CONCLUSIONES

Esta investigación realizó un análisis comparativo exhaustivo entre las tecnologías inalámbricas Bluetooth, WiFi, ZigBee y LoRa, evaluando una variedad de parámetros críticos como topología de red, tasa de transferencia, frecuencia, cobertura, tamaño de la red, modulación, trama de datos y duración de la batería. Este estudio concluyó que ZigBee es la opción más idónea para implementar un sistema de monitoreo en una granja acuícola. La capacidad de ZigBee para formar redes en malla robustas y autoconfigurables, aunada a su bajo consumo energético, la convierten en una solución ideal para entornos donde la infraestructura puede ser limitada y la vida útil de las baterías es crítica. Además, ZigBee ofrece una mayor inmunidad a las interferencias, lo cual es fundamental en entornos industriales como una granja acuícola. Para garantizar una cobertura completa y una detección oportuna de cambios en los parámetros del agua, se propone instalar un nodo de medición por cada 1000 m² de superficie de la granja. Estos nodos, equipados con sensores de temperatura, pH y oxígeno disuelto, transmitirán datos a un servidor cada 30 minutos. La frecuencia de muestreo y la densidad de la red han sido seleccionadas para permitir una respuesta rápida ante cualquier evento. Por estas razones, se concluye que ZigBee es la opción más viable para

asegurar una comunicación eficiente y confiable en el entorno de la acuicultura. Quedando descartadas las tecnologías LoRa y Bluetooth debido a que no soportan topología de red en malla y WiFi por el alto consumo de energía requerido.

5. REFERENCIAS

- [1] J. Salazar. Redes inalámbricas. TECHpedia. Electronic form. European Virtual Learning Platform for Electrical and Information <https://techpedia.fel.cvut.cz>
- [2] D. Franco, F. Castillo. Comunicaciones Inalámbricas, Bluetooth. Prisma tecnológico. Vol. 1. Sep. 2009. pp. 19 -21.
- [3] A. Wang. Comparación entre LoRa y otras tecnologías inalámbricas. Septiembre 2021. MOKOLoRa. <https://www.mokoLoRa.com/es/LoRa-and-wireless-technologies/>. Consultado 27 junio 2024.
- [4] M. Castells. La era de la información. Economía, sociedad y cultura (Vol I: La sociedad red). Alianza Editorial. Madrid. 1997. pp. 506. ISBN 84-206-4247-9.
- [5] J. De Aragón, "UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO 'LA TECNOLOGÍA DE LA NORMA IEEE 802.15.1,'" Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 2006.
- [6] O. A. Soto, "Comparación de la eficiencia volumétrica entre redes inalámbricas WiFi y WiMAX Capítulo 3. Estándar IEEE 802.11 WiFi 3.1 INTRODUCCIÓN," Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 2011. Accessed: Jun. 27, 2024. [Online]. Available: http://132.248.9.195/ptb2011/noviembre/0674882/0674882_A1.pdf
- [7] F. López, "El estándar IEEE 802.11 Wireless LAN".
- [8] J., Mendez, J., Dávila, S., & Gómez, G. (2021). IEEE IEE 802.15.4, Redes de Sensores Inalámbricas-WSN y Smart campus.
- [9] A. Ahmed. (2023). Introduction to ZigBee Technology.
- [10] S. Mohanty. (n.d.). Energy Efficient Routing Algorithms for Wireless Sensor Networks and Performance Evaluation of Quality of Service for IEEE 802. <https://www.researchgate.net/publication/47737848>
- [11] A. Dólera. (2019). MODELADO DE REDES LORAWAN APLICADAS A LA CONSERVACIÓN PREVENTIVA DE PATRIMONIO CULTURAL. www.etsit.upv.es
- [12] L. Xiao., & S. Xie. (2018). Device of Port Shore Power of Envelope Voltage of Wireless Seamless Connection. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 189/5/0520