



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Comunicaciones

Red de Comunicación Inalámbrica Heterogénea Utilizando
Módulos Esp32

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Tecnologías, Sistemas y Redes de
Comunicaciones

AUTOR/A: Rodriguez Mejia, Jose

Tutor/a: Lloret Mauri, Jaime

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Máster Universitario
en Tecnologías, Sistemas y
Redes de Comunicaciones



DEPARTAMENTO DE
COMUNICACIONES

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Comunicaciones

Red de Comunicación Inalámbrica Heterogénea
Utilizando Módulos Esp32.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Tecnologías, Sistemas y
Redes de Comunicaciones

AUTOR/A: Rodríguez Mejía, Jose Agustín
Tutor/a: Lloret, Jaime
CURSO ACADEMICO: 2023/2024

Agradecimiento

Deseo dedicar este logro, en primer lugar, a Dios, quien nos brinda la Salud y todas las herramientas necesarias para alcanzar nuestros sueños. También quiero expresar mi gratitud hacia mi amada Familia quienes son mi mayor bendición y fuente de motivación. En especial agradezco a mi esposa Sonia Elizabeth e hijos Mathías y Stefano que son el motor de mi vida y son mi inspiración para alcanzar mis metas con disciplina y perseverancia. Además, quiero reconocer el incondicional apoyo de mis padres, Agustín y Teresa quienes siempre han estado presentes a lo largo de mi vida y me han ayudado a completar esta maravillosa experiencia.

No podía dejar de agradecer a mi tutor Jaime Lloret por la gran ayuda y la predisposición que me ha brindado en esta formación profesional, así también como el director de la carrera Juan Reig siempre colaborándonos en todas las necesidades de los alumnos aun desde nuestro país de origen siendo grandes personas y excelentes profesionales.

Resumen

El proyecto consiste en la creación de una red de nodos con módulos ESP32 utilizando una Placa de desarrollo llamada Wireless Stick (V3) de la marca Heltec Automation, la cual tiene como control un microprocesador ESP32-SFN8 de 32 bits. Posee un chip Lora cuya descripción técnica es el SX1262, y como característica principal ofrece conectividad para utilizar tecnologías como Wifi, Bluetooth LE (BLE) y LoRa.

El objetivo es que la selección de la tecnología inalámbrica de comunicación esté basada en las condiciones que existan en cada momento sobre el medio inalámbrico. Por lo tanto, se crearán algoritmos que decidan qué tecnología utilizarán para comunicarse. Para esto, se utilizó el entorno Arduino IDE para la programación de los nodos.

La red está conformada por el nodo principal, al cual lo llamaremos Servidor (nodo1), que será el encargado de monitorear los nodos que conforman la red, en este caso definidos como Cliente 2 (nodo2) y Cliente 3(nodo3).

Veremos el potencial del módulo en las pruebas realizadas junto con las distancias alcanzadas en cada tecnología.

Palabras Claves: Wireless, frecuencia, Red, RSSI.

Abstract

This project consists of the creation of a network of nodes with ESP32 modules using a development board called Wireless Stick (V3) from the Heltec Automation brand, which is controlled by a 32-bit ESP32-SFN8 microprocessor. It has a Lora chip whose technical description is SX1262, and as its main feature it offers connectivity to use technologies such as Wifi, Bluetooth LE (BLE) and LoRa.

The objective is that the selection of wireless communication technology is based on the conditions that exist at all times on the wireless medium. Therefore, algorithms will be created that decide what technology they will use to communicate. For this, the Arduino IDE environment was used for programming the nodes.

The network is made up of the main node, which we will call Server (node1), which will be in charge of monitoring the nodes that make up the network, in this case defined as Client 2 (node2) and Client 3 (node3).

We will see the potential of the module in the tests carried out along with the distances achieved in each technology.

Abreviaturas

BLE	Bluetooth Low Energy
WSN	Wireless Sensor Networks
UUID	Universally Unique Identifier
TCP	Transmission Control Protocol
ATT	Low Energy Attribute Protocol
AODV	Ad-hoc On demand Distance Vector
OLSR	Optimized Link State Routing
DSDV	Destination Sequenced Distance Vector
QoS	Quality of Service
MANETs	Mobile Ad-Hoc Networks
MAC	Media Access Control
RSSI	Received Signal Strength Indicator

Índice**Capítulo 1****1. Introducción**

1.1	Objetivos.....	9
1.2	Precedentes del Proyecto	9
1.3	Estructura del Proyecto.....	10

Capítulo 2**2. Estado del Arte**

2.1	Redes Inalámbricas de Sensores o Wireless Sensor Networks	11
2.1.1	Arquitectura del Protocolo de una WSN.....	11
2.1.2	Tipos de Tecnologías Inalámbricas.....	12
2.1.2.1	Redes Inalámbricas de área amplia (WWAN).....	12
2.1.2.2	Redes de Área Personal Inalámbrica (WPAN).....	12
2.1.2.3	Redes de Área local Inalámbrica (WLAN).....	12
2.1.3	Tecnología Wifi.....	13
2.1.4	Tecnología Bluetooth Low Energy (BLE)	13
2.1.5	Tecnología LoRa.....	14
2.2	Internet de las cosas (IOT).....	15
2.2.1	Ventajas	16
2.2.2	Desventajas	16
2.3	Módulos Esp32.....	16
2.4	Placa de Desarrollo de Heltec Wireless Stick V3.....	17

Capítulo 3**3. Propuesta**

3.1	Descripción del Proyecto	19
3.2	Arquitectura de la Red heterogénea.....	19
3.3	Proceso del Sistema	19
3.3.1	Funciones de los Nodos.....	21
3.3.2	Interconexión de Tecnologías.....	23
3.3.3	Protocolos y Estándares	24
3.3.4	Seguridades	24

Capítulo 4**4. Desarrollo**

4.1	Dispositivo	25
4.2	Software.....	25
4.3	Programación De Nodos	26
4.3.1	Configuración WIFI.....	25
4.3.2	Configuración BLE.....	29
4.3.3	Configuración LoRa.....	31

Capítulo 5**5. Pruebas**

5.1	Prueba de la Red heterogénea	33
5.1.2	Selección BLE.....	33
5.1.3	Selección WIFI.....	37
5.1.4	Selección LoRa.....	42

Capítulo 6**6 Conclusiones**

6.1	Cumplimiento del Objetivo	47
6.2	Conclusiones	47
6.3	Problemas encontrados y Como se han solucionado.....	47
6.4	Aportaciones personales	48
6.5	Futuras líneas de trabajo	48

Capítulo 7

7	Bibliografía	50
----------	---------------------------	-----------

Índice Figuras y Tablas

Figura 1 Dispositivos de una WSN	11
Figura 2 Capas de una red WSN	12
Figura 3 Tecnologías Inalámbricas [6].....	12
Figura 4 Distribución de canales de frecuencia BLE [7].....	13
Figura 5 Pila de protocolo BLE [7].....	14
Figura 6 LoRa y LoRaWAN [13].....	14
Figura 7 Impacto de IOT en diversos sectores [9].....	15
Figura 8 Diagrama de Bloques ESP32[11].....	17
Figura 9 Diagrama de Pines Wireless Stick V3 [12].....	17
Figura 10 Arquitectura de hardware sistema.....	19
Figura 11 Algoritmo del Sistema en funcion del RSSI.....	20
Figura 12 Configuración BLE	21
Figura 13 Configuración Wifi.....	22
Figura 14 Configuración LoRa.....	22
Figura 15 Placa de Desarrollo Wireless stick V3.....	25
Figura 16 Prueba de Placas de Desarrollo Wireless stick V3.....	25
Figura 17 Desarrollo del código en Placas de Desarrollo Wireless stick V3...	26
Figura 18 Ubicación donde se realizan las Pruebas.....	33
Figura 19 Parámetros para Tecnología BLE	33
Figura 20 ServerNodo1 Selección Tecnología BLE.....	34
Figura 21 Monitoreo de ServerNodo1-Recepcion de mensajes.....	34
Figura 22 Comportamiento de RSSI en tecnología BLE	35
Figura 23 ServerNodo1 anunciando su servicio	35
Figura 24 Captura de datos en Servicio BLE	36
Figura 25 Tráfico Capturado de la Comunicación BLE	36
Figura 26 Parámetros de prueba Wifi	37
Figura 27 Selección a Tecnología Wifi	37
Figura 28 Intercambio de Mensajes entre Nodo2 y Nodo3.....	38
Figura 29 RSSI de la Red Wifi	38
Figura 30 Capturas de tráfico con Wireshark	39
Figura 31 Grafico de comunicación en wifi	39
Figura 32 Diagrama de flujo de negociación de nodos	40
Figura 33 Protocolos capturados en comunicación Wifi	41
Figura 34 Congestión Wifi canal 2.4 GHZ	41
Figura 35 Parámetros de pruebas en Tecnología LoRa.....	42
Figura 36 Comunicación Servidor -Nodos en Tecnología LoRa.....	43
Figura 37 Comportamiento de RSSI en Tecnología LoRa.....	44
Figura 38 Pruebas en Tecnologia LoRa	44
Figura 39 Prueba de Alcance de 62 metros con selección LoRa.....	45
Figura 40 Prueba de Alcance de 163 metros con selección LoRa.....	45
Figura 41 Cantidad de memoria utilizada en el código.....	48
Tabla 1 : Características del modulo Wireless Stick V3[12].....	18
Tabla 2 : RSSI de acuerdo a la distancia en BLE.....	34
Tabla 3 : Identificación de los Nodos en la red	38
Tabla 4 : Protocolos y direcciones Obtenidas en la comunicación.....	40
Tabla 5 : Valores de RSSI en Función de la Distancia para Tecnología LoRa...	43

Capítulo 1

1. Introducción

En el Mundo actual donde la conectividad inalámbrica es fundamental no podemos permitir que nuestras redes de comunicaciones se queden obsoletas. Mas bien debemos explorar el amplio abanico de opciones que nos ofrece la tecnología para mejorar y optimizar nuestros recursos.

Normalmente en despliegues de redes de comunicaciones, encontramos en su mayoría redes homogéneas, lo que significa que los dispositivos que la conforman tienen las mismas características, especificaciones y capacidades de procesamiento. Sin embargo, estas redes son limitadas para adaptarse a diferentes situaciones y condiciones que pueden surgir en un enlace de comunicaciones. Es por ello por lo que las redes heterogéneas están ganando terreno, ya que permiten que los integrantes de la red puedan tener diferentes características, como capacidad de memoria, la posibilidad de elegir entre diferentes tecnología y fabricantes, ofreciendo así flexibilidad a la red.

Para el desarrollo de este proyecto, aprovecharemos esta característica para crear una **Red de Comunicación Inalámbrica heterogénea** que nos permita tener una alternativa para utilizar múltiples tecnologías de comunicación, como BLE (Bluetooth Low Energy), WIFI y LoRa (Long Range). Para esto utilizaremos los **módulos ESP32**, que nos permite aprovechar esta característica y realizar estos cambios, proporcionando dinamismo y eficiencia a la red en el momento de la comunicación.

1.1 Objetivos

Para la ejecución de este proyecto se plantean los siguientes objetivos:

- Investigar sobre Redes Inalámbricas de Sensores (WSN), enfocándose en comprender sus características, limitaciones y aplicaciones.
- Identificar y describir los diferentes tipos de medios inalámbricos en los que pueden operar las tecnologías Wifi, BLE y LoRa, tales como entornos urbanos, industriales, y domésticos, evaluando las condiciones específicas que afectan la propagación de señales en cada uno de estos medios.
- Crear una red heterogénea utilizando módulos ESP32, donde la selección de la tecnología inalámbrica de comunicación esté basada en las condiciones específicas de los medios inalámbricos identificados, como la interferencia, distancia de comunicación y requerimientos de energía.
- Realizar mediciones del rendimiento de las comunicaciones en los tres medios inalámbricos previamente identificados utilizando las tecnologías Wifi, BLE y LoRa.

1.2 Precedentes del Proyecto

En esta sección, presentamos los precedentes más relevantes, con investigaciones y trabajos relacionados con el tema:

Esta referencia [1] concluye que tanto la tecnología LoRa como el WiFi presentan potenciales soluciones para aplicaciones de IOT, aunque con distintas características. LoRa se destaca por su utilidad en el envío esporádico de datos, como la ubicación cada 10 minutos, ideal para monitorear grupos vulnerables dentro de áreas extensas con muy poco consumo. Por contraste, WiFi es apropiado sólo en entornos con proximidad cercana entre dispositivos y puertas de enlace, y su alto consumo de energía lo hace menos adecuado para dispositivos operados por baterías como por ejemplo los wearables en rescates. Futuras investigaciones se enfocarán en la minimización del consumo de energía y en la conmutación de red según la disponibilidad.

En [2] tenemos el desempeño de sensores en tecnologías inalámbricas como LoRa, Bluetooth de bajo consumo y Wifi, realiza la implementación de una red con nodos en modo cliente - servidor utilizando un dispositivo de control Raspberry PI3, que ofrece un buen desempeño, pero que no hubo buenos resultados en el almacenamiento en la aplicación web, mostrando inestabilidad.

En [3] este estudio hace una Evaluación del Consumo en Redes de comunicación y realiza la implementación de una red heterogénea, que utiliza tecnologías inalámbricas como Bluetooth de bajo consumo y LoRa para la comunicación de los nodos, y los resultados indican que el consumo de los dispositivos en tecnología LoRa, fue diez veces menor que tecnologías tradicionales y que la tecnología BLE aun obtuvo un mejor resultado en lo que respecta de consumo energético.

En [4] se realiza la investigación de una red conformada por un servidor y sensores de transmisión de datos marca Xiaomi con tecnología Zigbee, instalados en clientes que deben ser monitoreados permanentemente por enfermedades o tratamientos, concluyeron que el sistema recopiló datos durante 15 días dando buenos resultados.

Este estudio [5] se enfoca en las Redes Inalámbricas, que son redes no estructuradas y deben manejar la movilidad, cambios dinámicos en la topología y la falta de confiabilidad en el medio de comunicación. Los protocolos de enrutamiento en estas redes son cruciales para descubrir, establecer y mantener rutas entre nodos, considerando factores como el número mínimo de saltos, interferencias, retrasos, tasas de error, consumo de energía, velocidades máximas de datos y estabilidad de ruta. El documento detalla la clasificación y análisis de diversos protocolos de enrutamiento.

1.3 Estructura del proyecto

El proyecto sigue una estructura que incluye diferentes aspectos importantes que vamos ir revisando por ejemplo en el Capítulo 2, se analiza el fundamento teórico y los estudios previos relacionados con el proyecto, dando un enfoque a las Redes Inalámbricas de Sensores. Además, se profundiza en tecnologías específicas como Wifi, Bluetooth Low Energy (BLE) y LoRa, resaltando sus aplicaciones y características fundamentales, lo que establece un contexto necesario para comprender la propuesta del proyecto. El Capítulo 3 ofrece una visión detallada del proyecto, con una descripción general del mismo, explicando la estructura de la red propuesta y cómo se integran las diversas tecnologías.

En el Capítulo 4, se proporciona información detallada sobre el desarrollo del proyecto propuesto, incluyendo las herramientas y software utilizados, así como la programación específica de los nodos. El Capítulo 5 detalla las pruebas realizadas para validar el funcionamiento de la red heterogénea propuesta y cómo funciona durante la selección y análisis de cada tecnología utilizada.

Por último, en el Capítulo 6, vamos a presentar el cumplimiento de objetivos, los problemas encontrados y sus soluciones. También se destacan las contribuciones personales y se señalan posibles direcciones futuras para la investigación con las respectivas conclusiones del proyecto.

Capítulo 2

2. Estado del Arte

2.1 Redes Inalámbricas de Sensores o Wireless Sensor Networks

Una Red Inalámbrica de Sensores es un sistema que emplea sensores para monitorear diversos parámetros ambientales, como temperatura, humedad, presión, luz y sonido.

Estos nodos se comunican de manera inalámbrica para recopilar, procesar y transmitir datos hacia un nodo central o estación base. Las WSN encuentran aplicaciones en campos como el monitoreo ambiental, agricultura, salud, control industrial, seguridad, entre otros. Son especialmente útiles en entornos donde el acceso por cable resulta difícil o inexistente.

Cada nodo en una red de sensores debe contar con energía suficiente para realizar sus funciones de manera autónoma, por ende, debemos considerar el consumo energético como un factor muy importante al querer implementar una red de estas características. Además, las WSN son autónomas y pueden adaptarse dinámicamente debido a la función de los protocolos de enrutamiento. La disposición de los dispositivos en una red inalámbrica de sensores se muestra a continuación en la **Figura 1**.

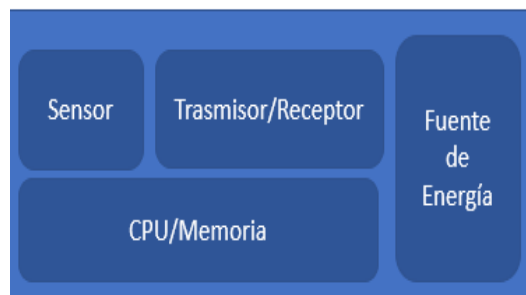


Figura 1 Dispositivos en una WSN

Los principales parámetros que debemos considerar en la red son la precisión, cobertura, seguridad, tiempo de respuesta y tiempo de vida. Asimismo, en un nodo sensor, los parámetros principales a tener en cuenta son el costo energético, seguridad, costo computacional y flexibilidad.

2.1.1 Arquitectura del Protocolo de una WSN

La arquitectura de un protocolo de comunicación WSN está conformada por una pila de cinco capas, que se compone como lo indica la Figura 2, que esta creada para gestionar el sistema de una manera eficaz cuando ocurre transmisión y recepción de datos. Esta estructura, constituye un marco integral que guía el intercambio de información en un entorno de redes de sensores inalámbricos.

Cada capa desempeña un papel vital en el proceso de comunicación, desde establecer la conexión hasta garantizar la integridad de los datos transmitidos.

- En la Capa de Aplicación, se desarrolla el nexo entre el sistema y el entorno, se pueden desarrollar diferentes tipos de aplicaciones según las necesidades del sistema.
- La Capa de Transporte tiene como objetivo mantener el flujo de datos, garantizando que la información llegue sin problemas.
- La Capa de Red, podemos decir que se encarga de gestionar el enrutamiento entre los nodos.
- La Capa de Data Link es la encargada de dar una comunicación oportuna y fiable de igual a igual.
- La Capa Física se encarga de la transmisión física de datos a través del medio de comunicación.

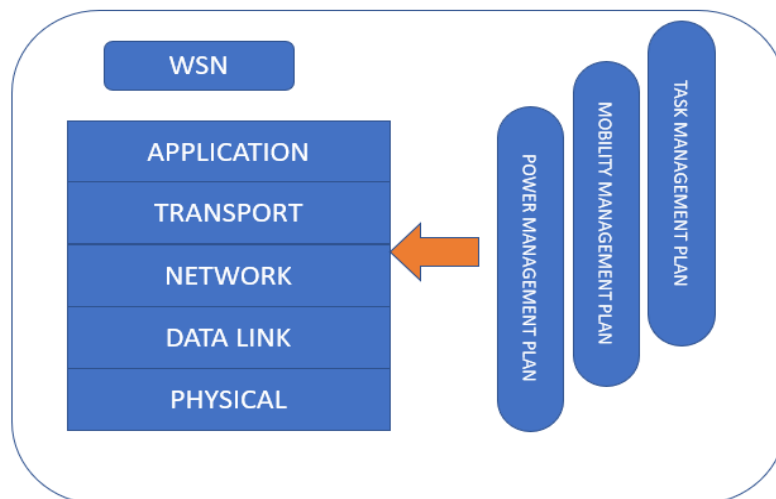


Figura 2 Capas de una red WSN

2.1.2 Tipos de Tecnologías Inalámbricas

En la actualidad, existe un gran número de tecnologías inalámbricas, las cuales se resumen en la **Figura 3**. Este esquema ofrece una visión rápida de los tipos de tecnologías inalámbricas existentes. [6]

2.1.2.1 Redes Inalámbricas de área amplia (WWAN)

La referencia [6] se refiere a redes de comunicación inalámbrica que proporcionan acceso a grandes áreas geográficas. Este tipo de redes utiliza ondas de radio para comunicarse y ofrece la posibilidad de transmitir datos a largas distancias.

2.1.2.2 Redes de Área Personal Inalámbrica (WPAN)

Abarca las redes de corto alcance, como, por ejemplo, la tecnología Bluetooth y Zigbee, las cuales se utilizan para conectar dispositivos de manera personal y cercana. [6]

2.1.2.3. Redes de Área local Inalámbrica (WLAN)

Estas redes son infraestructuras tecnológicas que permiten la comunicación de dispositivos sin necesidad de conexiones físicas en hogares, oficinas, etc. Las redes inalámbricas utilizan estándares como Wifi (Wireless Fidelity) para la comunicación entre dispositivos. [6]

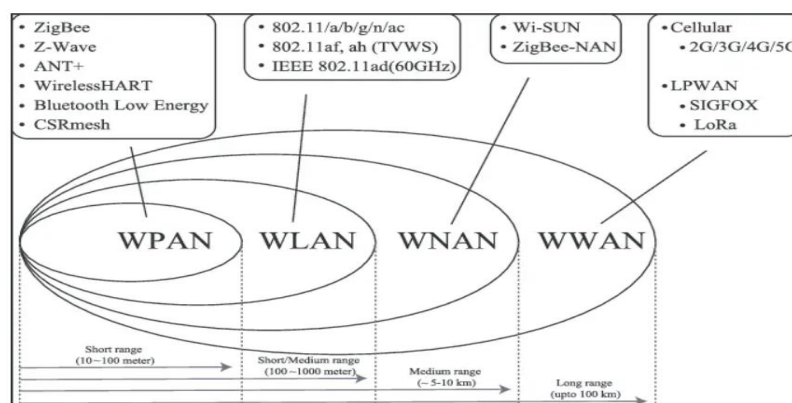


Figura 3 Tecnologías Inalámbricas [6]

2.1.3 Tecnología Wifi

En 1999, la organización Wi-Fi Alliance estandarizó el uso de redes inalámbricas mediante el protocolo de red IEEE 802.11. Estos estándares se implementan con el objetivo de mejorar la velocidad, el alcance y la confiabilidad de las conexiones, permitiendo la interconexión de dispositivos como teléfonos móviles, ordenadores y televisores, entre otros.

De acuerdo con [6], el protocolo 802.11a funciona en la frecuencia de 5 GHz y proporciona una mayor capacidad de transferencia de datos en comparación con las versiones previas de los estándares de comunicación inalámbrica.

Podemos decir que el protocolo 802.11b trabaja con la frecuencia de 2.4 GHz siendo de los primeros estándares en ser utilizado en conexiones a teléfonos móviles. Proporciona tasas de conexión más bajas en comparación con el estándar 802.11a, y el 802.11g se destaca por ofrecer tecnologías de alta velocidad, y por último el 802.11n brinda un rendimiento superior en comparación con los estándares anteriores trabajando también en la frecuencia de 5GHz.

2.1.4 Bluetooth Low Energy (BLE)

Esta tecnología, representa una versión moderna del Bluetooth tradicional y está diseñado para la transmisión de información con un alcance reducido. Cabe señalar que la distribución de canales de comunicación comparada con la versión anterior es optimizada para minimizar interferencias. Esta distribución se puede revisar con detalle en la Figura 4. Una de sus mejores características es su consumo energético, si tenemos proyectos donde se requiere optimizar la duración de la batería esta sería una opción muy eficiente. [7],

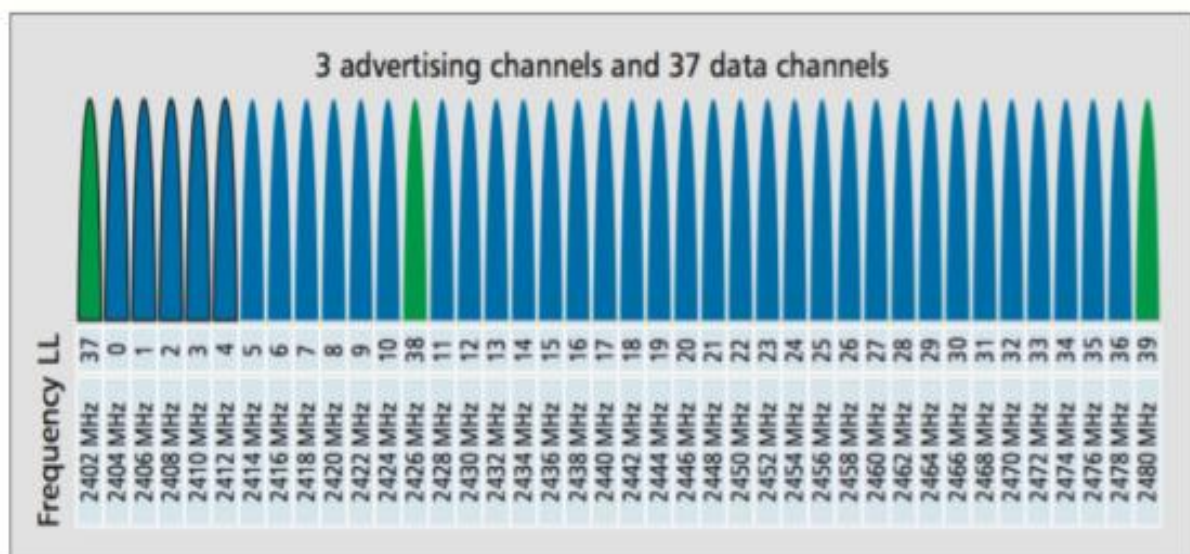


Figura 4 Distribución de canales de frecuencia BLE [7]

Perfiles y Servicios GATT:

BLE utiliza perfiles y servicios GATT (Registro de Atributos Genéricos), para definir como los dispositivos interactúan entre si como se detalla en la Figura 5. Además, incorpora características de seguridad, como encriptación y autenticación, con el fin de garantizar la seguridad de las conexiones entre dispositivos. BLE opera como un servicio de anuncios, donde existen dispositivos periféricos que emiten datos y dispositivos centrales que pueden leer estos datos o anuncios.

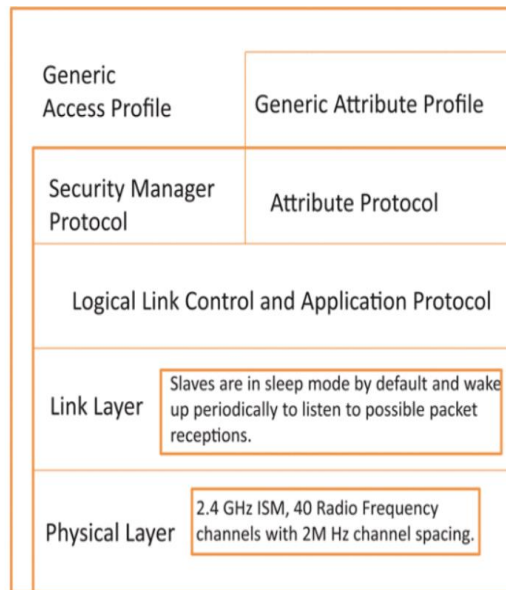


Figura 5 Pila de protocolo BLE [7]

2.1.5 LoRa

Esta tecnología fue desarrollada por la empresa Semtech Corporation, con sede en California. Semtech se especializa en la fabricación de semiconductores y soluciones de comunicación. LoRa, que significa Long Range, es la tecnología que desarrollaron y pertenece a la categoría de tecnologías para largas distancias. LoRa utiliza una modulación específica para sus dispositivos. [8]

Es importante destacar que LoRaWAN es el protocolo que especifica cómo se envían y reciben los paquetes de datos en este tipo de redes, así lo podemos ver en la Figura 6.

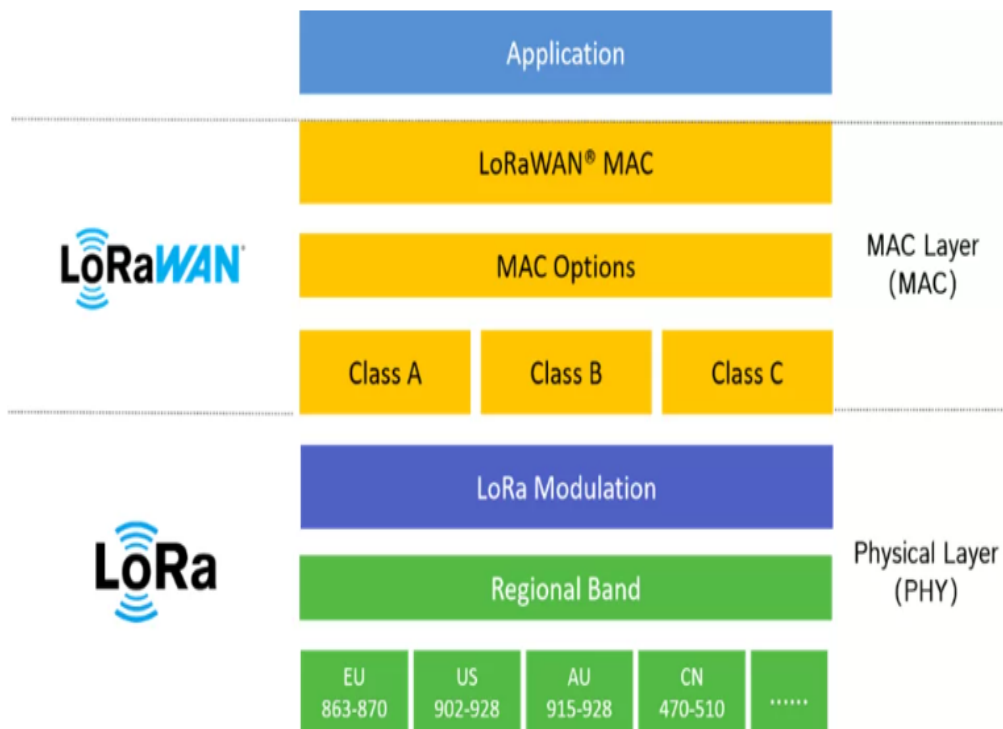


Figura 6 LoRa y LoRaWAN [8]

Debido a la versatilidad de esta innovadora tecnología, mencionaré algunos ejemplos donde es utilizada:

- Industria: Control y procesos industriales.
- Smart City: Controlar eficientemente la gestión de recursos urbanos.
- Domótica / edificios inteligentes: Automatización y control de dispositivos en hogares y edificios.
- Cuidado de la salud inteligente: Aplicaciones para monitoreo remoto de pacientes y gestión eficiente de recursos médicos.
- Seguridad y vigilancia: Sistemas de seguridad y monitoreo que pueden ser implementados de manera eficiente.
- Agricultura: Monitoreo de cultivos, gestión de recursos hídricos y control de sistemas de riego.
- Redes de sensores: Implementación de redes de sensores para diversas aplicaciones de monitoreo y recolección de datos.

Estos son solo algunos ejemplos, pero el potencial que tiene puede adaptarse a una variedad de necesidades y contextos.

2.2 Internet de las cosas (IOT)

Este concepto que engloba interconexión de dispositivos mediante internet ha experimentado una evolución significativa en el mundo actual, analizado en la Figura 7, ofreciendo un conjunto de herramientas y soluciones que permitan la conectividad entre dispositivos en red. Los protocolos más utilizados para la comunicación incluyen CoAP, MQTT, XMPP, RESTful Services, 6LoWPAN, RPL, entre otros. [9]

A través de dispositivos de bajo costo, el IoT ofrece características de detección/actuación, comunicación, procesamiento y almacenamiento en la nube, así como el manejo de datos con tecnologías de big data. Esto permite implementar sistemas que brindan comunicaciones efectivas y confiables en diversas aplicaciones.

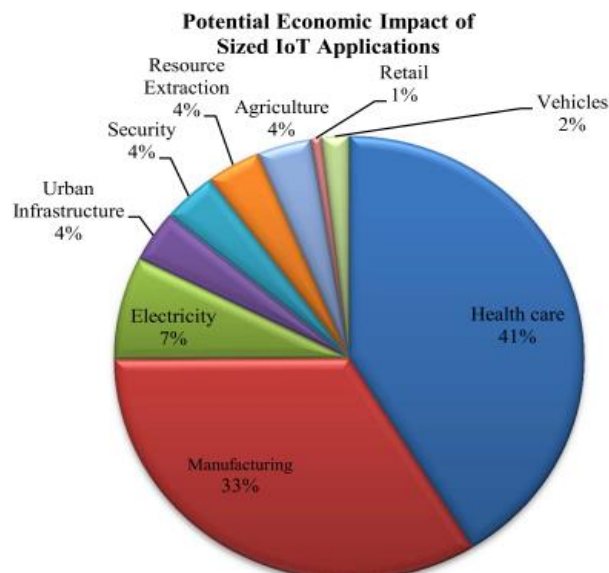


Figura 7 Impacto de IOT en diversos sectores [9]

2.2.1 Ventajas del Internet de las cosas

- Es heterogéneo y tiene la capacidad de conectarse a la red.
- Trasmisión de datos en Tiempo real.
- Ahorro energético.
- Dinamismo se comunica con el entorno más cercano.

2.2.2 Desventajas del Internet de las cosas

- La información no está cifrada
- Requiere una inversión previa
- La privacidad queda reducida
- Falta de estandarización

Como conclusion podemos decir que los dispositivos IoT están diseñados para interactuar con su entorno de manera autonoma, permitiendo que los sistemas se ajusten a cambios en las condiciones ambientales o de operación. Debemos de tener en cuenta las ventajas y desventajas al momento de diseñar e implementar soluciones IoT, para que nos den los beneficios esperados y disminuyan los riesgos existentes en el entorno secular.

2.2 Módulos ESP32

El ESP32, es una familia de Sistemas en Chip (SoC) desarrollada por la empresa Espressif. Ofrece una amplia gama de funciones y tiene la capacidad de integrar tecnologías como Wifi, Bluetooth y LoRa, lo que lo convierte en uno de los microcontroladores más versátiles y eficientes del mercado, como se muestra en la Figura 8. [10]

Las aplicaciones del ESP32, son muy extensas y pueden abarcar cualquier sector , incluyendo:

- En el ámbito de trabajo en **Aplicaciones para IOT**, es ampliamente utilizado debido a su capacidad para conectar dispositivos a Internet y gestionar grandes volúmenes de datos de forma eficiente.
- **En domótica**, este dispositivo puede controlar dispositivos del hogar de manera remota, proporcionando funcionalidades como control de luces, temperatura y seguridad.
- **En la industria**, tambien podemos indicar que se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, desde la monitorización de procesos hasta el control de maquinaria.
- **En redes de sensores**, puede recolectar datos de múltiples sensores, para su gestion y análisis.
- Finalmente, en aplicaciones **de Control y Monitoreo**, para gestionar remotamente sistemas en tiempo real.

Las plataformas disponibles para programar el ESP32 son:

- **Arduino IDE**
- **ESP-IDF**
- **MicroPython**

Además, el ESP32 ofrece una variedad de modelos para elegir, cada uno con características específicas que pueden variar según el consumo de energía, la temperatura y la capacidad de almacenamiento. Con todas estas características disponibles, el ESP32 se ha convertido en una opción muy popular y ampliamente utilizada.

El ESP32 posee una arquitectura de doble núcleo. El primer procesador es el Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6, que opera a una velocidad de hasta 240 MHz y ofrece un alto rendimiento y eficiencia energética. [11]

El segundo procesador es un Ultra-Low-Power de 32 bits, diseñado específicamente para manejar tareas de bajo nivel y operaciones que requieren un consumo mínimo de energía. Este núcleo se encarga de gestionar operaciones en segundo plano, como la gestión de la conectividad inalámbrica, el mantenimiento del sistema y el manejo de interrupciones. [11]

Esta configuración de doble núcleo del ESP32 proporciona la flexibilidad necesaria para adaptarse a una amplia variedad de aplicaciones. En conclusión, estos núcleos trabajan en conjunto para ofrecer un máximo rendimiento y proporcionar un consumo de la batería más óptimo.

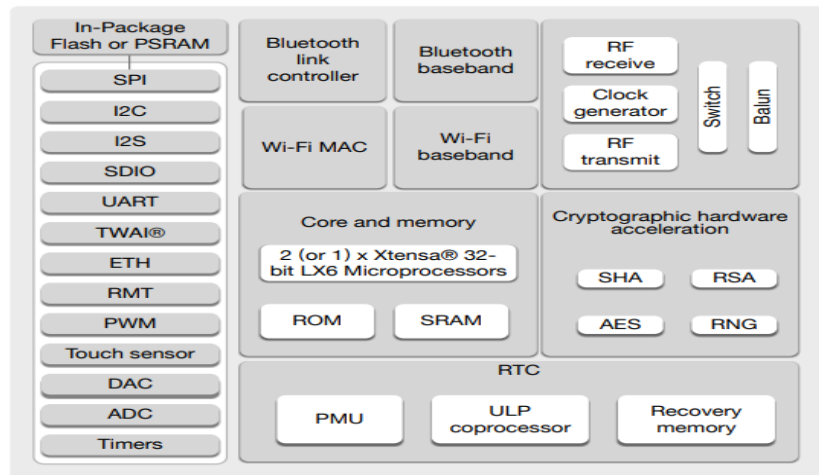


Figura 8 Diagrama de Bloques ESP32[11]

2.4 Placa de Desarrollo de Heltec Wireless Stick V3

El módulo representado en la Figura 9, es una placa desarrollada por Heltec Automation, hace uso de un System on Chip (SoC) basado en ESP32, el cual es muy versátil y ofrece excelentes prestaciones. Gracias a su potente hardware y a la capacidad de integrar tecnologías como Wifi, Bluetooth y LoRa, es muy útil para integrar redes de sensores, lo que nos permite recolectar y procesar información de manera muy sencilla. Además, el módulo es ideal para el control y monitoreo de procesos en tiempo real. En resumen, el módulo basado en ESP32 desarrollado por Heltec Automation es una herramienta versátil y poderosa que ofrece una variedad de soluciones innovadoras a bajo coste.

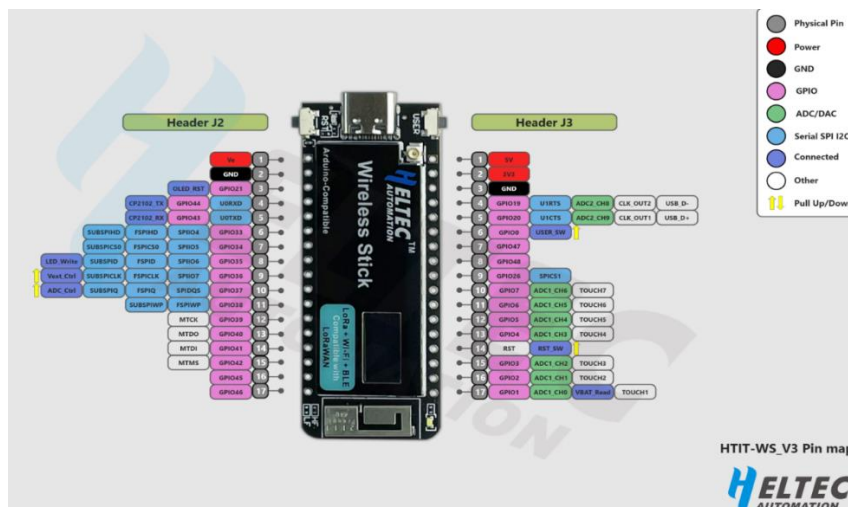


Figura 9 Diagrama de Pines Wireless Stick V3 [12]

4.1 Características

En la Tabla 1, que se presenta a continuación. Esta tabla proporciona las especificaciones y capacidades de la placa, incluyendo detalles como el procesador utilizado, la capacidad de memoria, las interfaces de entrada/salida disponibles y cualquier otro aspecto relevante para su funcionamiento y rendimiento:

Descripción	Wireless Stick inalámbrico (V3)
Microcontrolador	ESP32-S3(procesador Xtensa®de doble núcleo lx7 de 32 bits)
Chip de nodo LoRa	SX1262
USB	USB Tipo C
Oscilador de cristal	Oscilador de cristal con compensación de temperatura de alta precisión
Chip USB a Puerto serie	CP2102
Frecuencia	863 ~ 928 MHz (Europa)
Potencia de transmisión máx.	21 ± 1 dBm
Sensibilidad máxima de recepción	-134dBm
Wifi	802.11 b-g-n, hasta 150 Mbps
Bluetooth	Bluetooth LE
Recurso de hardware	7 * ADC1 + 2 * ADC2;
	7 * Toque;
	3 * UART;
	2*I2C;
	2 * SPI; etc.
Monitor	OLED de 0,49 pulgadas
Memoria	ROM de 384 KB; SRAM 512 KB;
	SRAM RTC DE 16 KB; Flash SiP de 8 MB
Temperatura	-20 ~ 70 °C
Dimensiones	58,08 * 22,6 * 8,2 mm

Tabla 1 : Características del modulo Wireless Stick V3[12]

Capítulo 3

3. Propuesta

3.1 Descripción del Proyecto

El objetivo es crear una red heterogénea utilizando la placa de desarrollo Wireless Stick (V3) de la marca Heltec Automation, la cual cuenta con la capacidad de trabajar con tecnologías como Wifi, LoRa y BLE. La arquitectura de la red estará compuesta por tres nodos, en la Figura 10 se ofrece una descripción detallada de esta estructura, que definiremos de la siguiente manera: el nodo principal, denominado Servidor (nodo1), será responsable del monitoreo de los demás nodos de la red, mientras que dos estaciones adicionales, llamadas Cliente 2 (nodo2) y Cliente 3 (nodo3), completarán la red. Nuestro principal objetivo será asegurar que la selección de la tecnología inalámbrica de comunicación (Wifi, LoRa y BLE) esté basada en las condiciones que prevalezcan en cada momento en el medio inalámbrico.

3.2 Arquitectura de la Red heterogénea

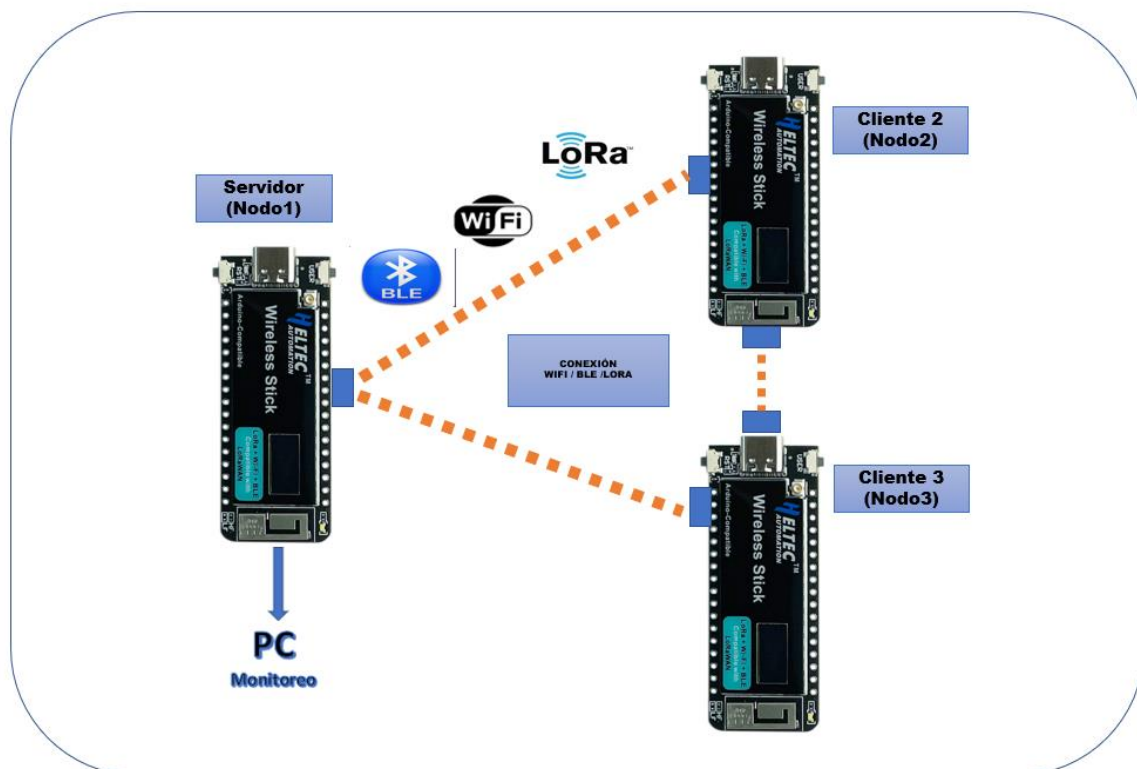


Figura 10 Arquitectura de hardware sistema

3.3 Proceso del Sistema

En este punto, se analizará el proceso del sistema que permite la selección de tecnologías de forma autónoma, basándose en el análisis del RSSI (Indicador de Intensidad de Señal), ya que esto permite que el sistema tome decisiones sobre la selección de tecnologías, priorizando aquellas que tengan una calidad de señal óptima. A continuación, se presenta una estructura detallada del contenido:

Seguidamente, se describe de manera general el proceso de selección a través de un diagrama de flujo, que se presenta en la Figura 11. Este diagrama ofrece una representación visual del flujo de decisiones y acciones involucradas en el proceso de selección, proporcionando una guía clara y concisa para entender los pasos a seguir.

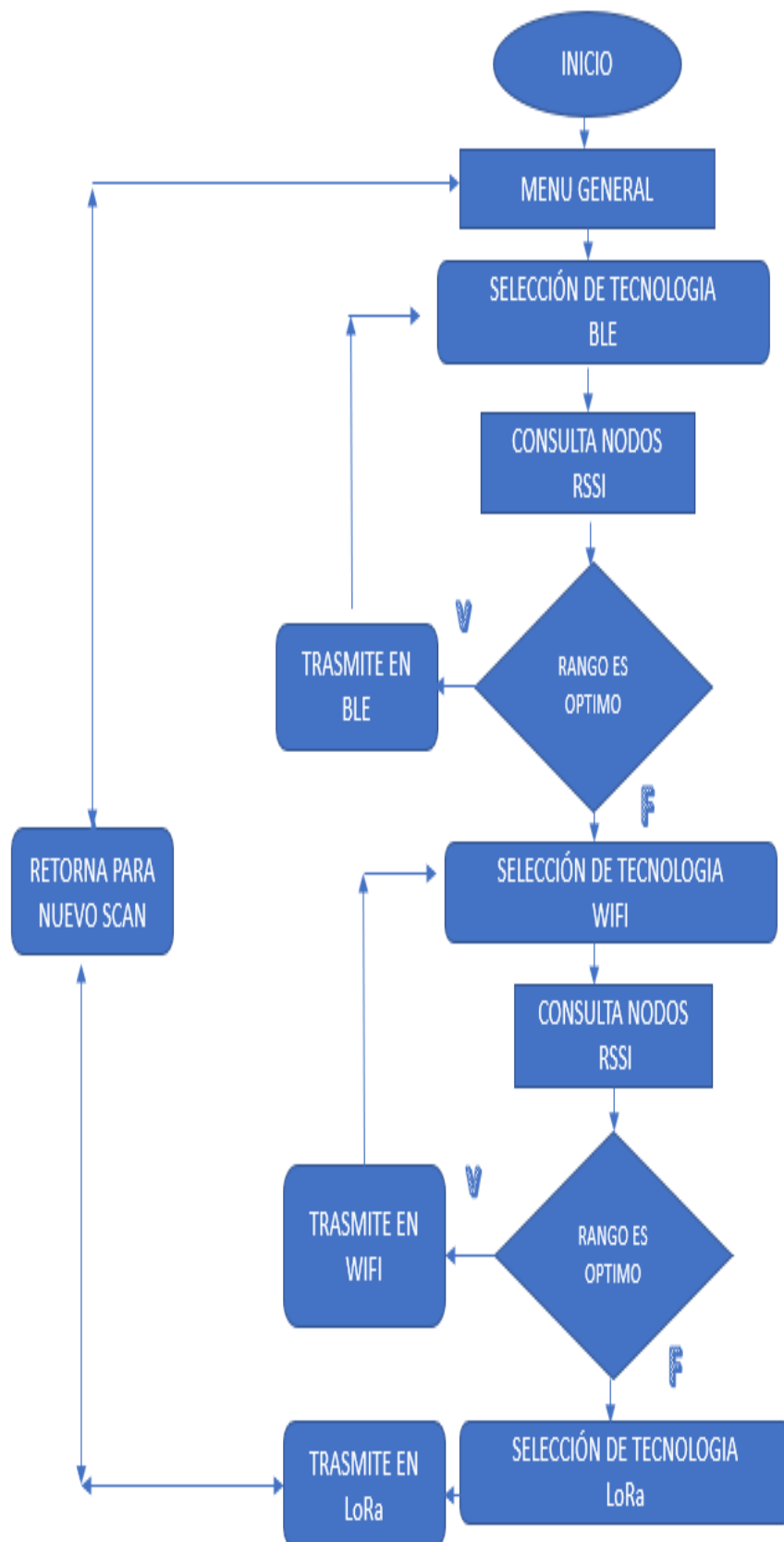


Figura 11 Algoritmo del Sistema en funcion del RSSI

3.3.1 Funciones de los Nodos

Para nuestro proyecto, hemos definido las funciones de los nodos según las tecnologías utilizadas de la siguiente manera:

En Selección de tecnología BLE:

En la Selección de tecnología BLE, los nodos funcionarán de la siguiente manera, según el esquema propuesto en la Figura 12:

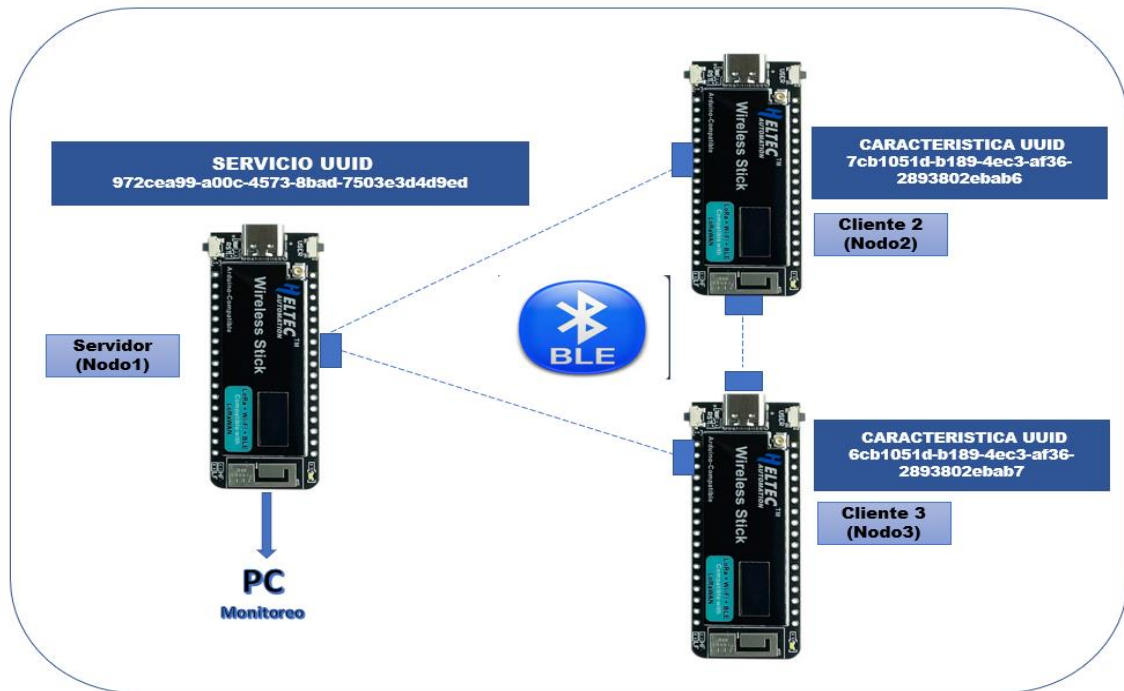


Figura 12 Configuración BLE

- **Nodo 1 (SERVIDOR)**
 1. Anuncia el Servicio BLE con este identificador
UUID = 972cea99-a00c-4573-8bad-7503e3d4d9ed
 2. Define características de Lectura y escritura a los nodos clientes.
 3. Una vez conectado envía RSSI (intensidad de la señal) para evaluación.
- **Nodo 2 (Cliente 2)**
 1. Realiza Scan del servicio BLE tratando de ubicar el UUID del Servidor
 2. Característica definida para lectura o escritura del nodo es el siguiente identificador
UUID= 7cb1051d-b189-4ec3-af36-2893802ebab6
 3. Transmite el RSSI a Servidor una vez conectado para evaluación.
- **Nodo 3 (Cliente 3)**
 1. Realiza Scan del servicio BLE buscando UUID del Servidor
 2. Característica definida UUID= 6cb1051d-b189-4ec3-af36-2893802ebab7
 3. Transmite el RSSI a Servidor una vez conectado para evaluación.

Esta estructura proporciona una visión clara de cómo cada nodo se comportará en la red BLE y cómo se comunicará con el Servidor para la evaluación de la señal.

En Selección de tecnología Wifi:

En la Selección de tecnología Wifi, los nodos se configurarán mediante el esquema de la Figura 13:

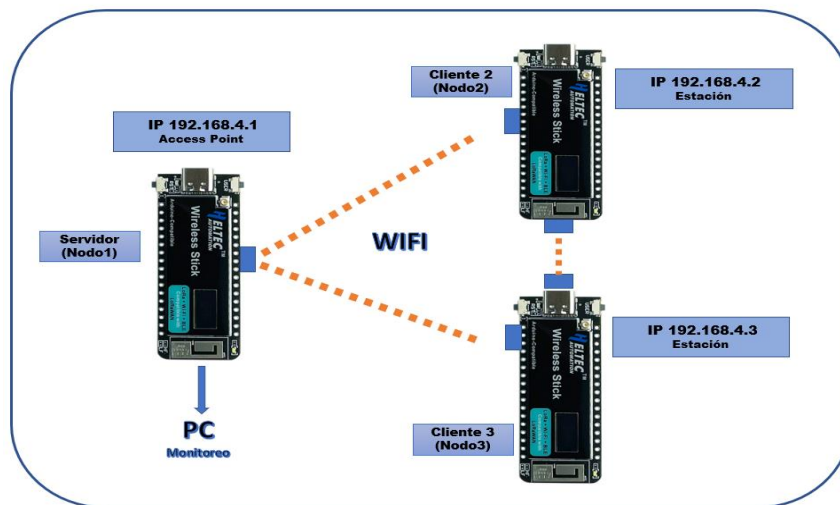


Figura 13 Configuración Wifi

- Nodo 1 (SERVIDOR): Estará en Modo Punto de Acceso (Access Point), encargado del envío y recepción de mensajes a los nodos.
- Nodo 2 (Cliente 2): Estará en Modo Estación, enviado y recibiendo mensajes al servidor.
- Nodo 3 (Cliente 3): También estará en Modo Estación, enviado y recibiendo mensajes al servidor.

Para un intercambio puntual de mensajes de aviso de estar en modo Wifi entre los nodos 2 y 3, se definen las siguientes configuraciones:

- Nodo 3 (Cliente 3): Cambiará temporalmente a Modo Punto de Acceso, enviando y recibiendo mensajes al Nodo 2.
- Nodo 2 (Cliente 2): Estará en Modo Estación, enviando y recibiendo mensajes al Nodo 3.

En Selección de tecnología LoRa:

En la Selección de tecnología LoRa, los dispositivos trabajarán con tres valores de frecuencia diferentes, dependiendo de con qué nodo se comuniquen, así como lo indica la Figura 14.

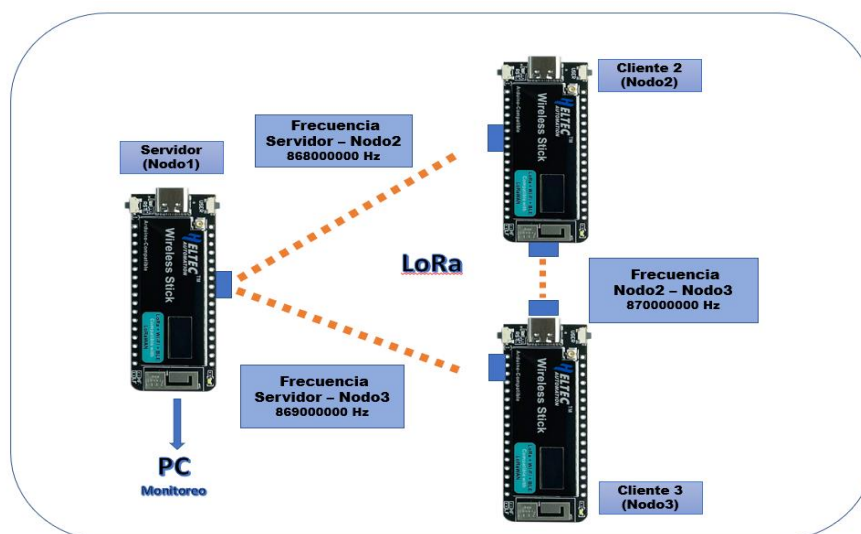


Figura 14 Configuración LoRa

Estas secuencias van a indicar cómo los nodos se comunican entre sí, transmitiendo mensajes y esperando respuestas en un entorno LoRa.

Nodo 1 (SERVIDOR):

1. LORA_TX_NODE2 (Transmite mensaje al Nodo 2).
2. LORA_RX_NODE2 (Recibe respuesta del Nodo 2).
3. LORA_TX_NODE3 (Transmite mensaje al Nodo 3).
4. LORA_RX_NODE3 (Recibe respuesta del Nodo 3).

Nodo 2 (Estación):

1. LORA_RX_SERVER (Inicia, esperando mensaje del servidor).
2. LORA_TX_SERVER (Transmite respuesta al servidor).
3. LORA_TX_NODE2 (Transmite mensaje al Nodo 3).
4. LORA_RX_NODE2 (Espera recepción de mensaje del Nodo 3).

Nodo 3 (Estación):

1. LORA_RX_SERVER (Inicia, esperando mensaje del servidor).
2. LORA_TX_SERVER (Transmite respuesta al servidor).
3. LORA_RX_NODE3 (Espera recepción de mensaje del Nodo 2).
4. LORA_TX_NODE3 (Transmite mensaje al Nodo 2).

3.3.2 Interconexión de Tecnologías

En este punto, vamos a explicar cómo se han definido los cambios entre las tecnologías Bluetooth LE, Wifi y LoRa. El código comenzará mostrando el Menú general, que detalla las tecnologías de trabajo a utilizar en el proyecto.

```
[TFM >--- RED DE COMUNICACIÓN INALAMBRICA HETEROGENEA UTILIZANDO MODULOS ESP32]
```

```
[ SELECCION DE COMUNICACION INALAMBRICA]
```

1. Tecnología BLE
2. Tecnología WiFi
3. Tecnología LoRa

```
[ EVALUA LAS CONDICIONES DEL MEDIO]
```

El proceso comienza con la primera tecnología, que es la **Tecnología BLE**. El servidor anunciará el servicio BLE y los nodos clientes se conectarán a la red para evaluar las condiciones del entorno. El parámetro de medida es el **RSSI (intensidad de la señal)**, para lo cual establecemos un **UmbralBLE** con un valor asignado de -70 dBm, que representa el límite máximo para una comunicación óptima. Si la intensidad de la señal cae por debajo de este umbral, se considera que la comunicación no es óptima y el sistema pasa a la función **NotificarCambioTecnologia()**, que notifica a los nodos que deben cambiar a la siguiente tecnología, que es Wifi.

En el proceso de la segunda tecnología, se ejecuta la creación de la red Wifi para que los nodos puedan conectarse a ella. Luego, los valores RSSI se almacenan en variables, llamadas **SenalNodo2** y **SenalNodo3**, para ser analizados en el código. Estas señales se comparan con el **UmbralWifi** que hemos definido de -70 dbm, y utilizando la función **RangoRSSI_NODO2()**, se determina si el uso de esta tecnología es óptimo o no.

Si la intensidad de la señal no es óptima, el servidor enviará un mensaje indicando que se debe **"SELECCIONAR LORA"**. Esto se realizará desde la función **NODO_SeleccionarLoRa()**, informando a ambos nodos que cambien a la siguiente tecnología, que es LoRa. Una vez en esta tecnología, se transmitirá el mensaje y se volverá a evaluar las condiciones desde la primera tecnología.

3.3.3 Protocolos y Estándares

Este proyecto se basa en el uso de protocolos y estándares de comunicación para garantizar la interoperabilidad, teniendo en cuenta las especificaciones y bibliotecas particulares de ESP32 en la Arduino IDE, con el objetivo de asegurar una implementación adecuada y eficaz en la red inalámbrica [6][7][8][13].

Bluetooth de bajo consumo se basa en su antecesor y está regulado por la agrupación de dispositivos Bluetooth (Bluetooth SIG), cuyas especificaciones y perfiles BLE se establecen para garantizar la conexión y la eficiencia energética. En el caso del módulo ESP32 Wireless Stick V3, utilizaremos las bibliotecas definidas que proporcionan soporte integrado para habilitar esta comunicación en Arduino.

El módulo ESP32 Wireless Stick V3 tiene la capacidad de conectarse a redes locales mediante el estándar de conexión IEEE 802.11 b/g/n, utilizando las funciones y protocolos del estándar. Además, emplearemos la biblioteca Wifi-desarrollada por los fabricantes para facilitar la comunicación sin problemas.

En cuanto a LoRa (Long Range), utilizamos bibliotecas específicas para la tecnología LoRa, basadas en la especificación LoRaWAN, que es un protocolo de red con un bajo consumo energético a larga distancia. Se emplearán tres frecuencias diferentes con el fin de reducir interferencias e incrementar la seguridad de las comunicaciones.

La comunicación de datos en la red Wifi utiliza los protocolos habituales de Internet, como TCP/IP. Esta conexión con estándares comunes permite la integración con sistemas y servicios, proporcionando robustez y escalabilidad en la comunicación.

3.3.4 Seguridad

En cuanto a la seguridad, se considerarán los siguientes aspectos, comenzando con la norma fundamental de que solo el personal autorizado deberá administrar el sistema. En el caso de Bluetooth Low Energy (BLE), se establecerá una red con acceso exclusivo para dispositivos autorizados, utilizando un Servicio BLE (SERVICE_UUID) con UUIDs definidos como Identificadores Únicos Universales.

Para la autenticación en la red Wifi, se implementará el uso de contraseñas seguras que garantice el acceso autorizado a la misma.

Finalmente, para la tecnología LoRa, se implementa una estrategia de seguridad que incluye el uso de tres frecuencias de comunicación distintas. Este enfoque no solo ayuda a evitar interferencias y congestiones en la señal, sino que también añade una capa de seguridad al dificultar las interceptaciones y accesos no autorizados. Al diversificar las frecuencias, se reduce la probabilidad de que un intruso pueda interceptar todas las comunicaciones, ya que tendría que comprometer múltiples canales simultáneamente.

En resumen, la implementación de estas medidas de seguridad específicas para cada tecnología (BLE, WiFi y LoRa) asegura un entorno de comunicación seguro y confiable, protegiendo la integridad del sistema y la privacidad de los datos transmitidos.

Capítulo 4

4. Desarrollo

En este capítulo, revisaremos el desarrollo del proyecto, detallando herramientas, dispositivos, software y las aplicaciones utilizadas.

4.1 Dispositivo

Como sensores y elementos de control se adquirieron tres placas de desarrollo Wireless Stick Versión 3 de la marca Heltec Automation. Estas placas presentan características técnicas interesantes, previamente mencionadas. Su característica principal es la capacidad de ofrecer conectividad para utilizar tecnologías como Wifi (estándar 802.11 b/g/n), Bluetooth LE (BLE) y LoRa, el dispositivo lo podemos ver en la **Figura 15**.



Figura 15 Placa de Desarrollo Wireless stick V3

- El módulo está controlado por un microprocesador ESP32-SFN8 de 32 bits, que opera a una frecuencia principal de 2.4 GHz.
- Incorpora un chip LoRa, el SX1262, con especificaciones técnicas detalladas.
- Cuenta con una entrada USB tipo C que incluye regulación y protección contra cortocircuitos.
- También dispone de un chip CP2102 para la conversión de USB a puerto serie.

1.2 Software

1. Utiliza Arduino IDE, una plataforma de software de código abierto.
2. Para su funcionamiento, es necesario instalar las librerías y bibliotecas específicas de la Placa Wireless Stick V3.
3. Se debe instalar el Driver CP2102 Chip USB a puerto serie, lo cual permitirá editar, compilar y cargar los códigos.

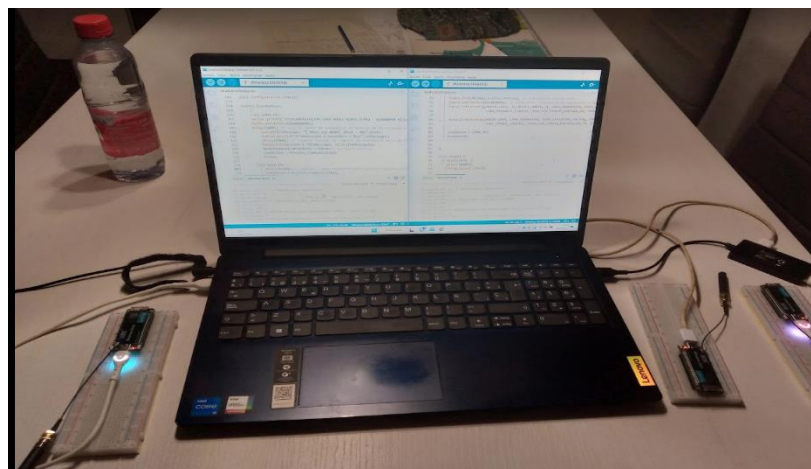


Figura 16 Prueba de Placas de Desarrollo Wireless stick V3

4.3 Programación De Nodos

Durante la edición del código, primero se definió un menú que estructurará las funciones del programa, facilitando en el momento de pruebas la comprensión del algoritmo para el usuario final. Además, la capacidad de realizar pruebas directamente desde el monitor serie agilizó significativamente el ciclo de desarrollo, permitiéndonos identificar y corregir rápidamente cualquier problema que surgiera.

La Figura 16 y la Figura 17 nos permiten ver este proceso, mostrando cómo el monitor serie se utilizó para llevar a cabo las diversas tareas de depuración, monitoreo y pruebas, para asegurar así un código que cumpla con todas las características que necesitábamos en el sistema.

```
Serial.println("[RED DE COMUNICACIÓN INALAMBRICA CON MODULOS ESP32] ");
Serial.println(" [ SELECCION DE COMUNICACION INALAMBRICA ] ");
Serial.println(" 1. Tecnología BLE");
Serial.println(" 2. Tecnología Wifi");
Serial.println(" 3. Tecnología LoRa ");
Serial.println(" ");
Serial.println(" [ EVALUA LAS CONDICIONES DEL MEDIO ] ");
Serial.println("1. Tecnología BLE SELECCIONADA");
Serial.println("SCAN Dispositivos ");
```



Figura 17 Desarrollo del código en Placas de Desarrollo Wireless stick V3

1.3.1 Configuración WIFI

Para habilitar la comunicación a través de Wifi, es primordial seguir las siguientes instrucciones que garanticen una conexión sin problemas. Estos pasos incluyen:

1. Agregar la Librería WIFI

Antes de iniciar la configuración relacionada con Wifi, es necesario asegurarse de que la librería este disponible en el entorno de desarrollo. Para ello, debemos agregar la librería al inicio del código de la siguiente manera:

```
#include <WiFi.h>
```

2. Creación de la Red y Seguridad de la red

Como siguiente paso, vamos a crear la red a la que el dispositivo se conectará, así como la configuración de la seguridad de dicha red. Esto lo logramos definiendo un nombre de red (SSID) y una contraseña para proteger los accesos no autorizados. Por ejemplo:

```
ssid = "Red_JOSE";
password = "123456789";
```

3. Asignar las Direcciones IP

Una vez que se ha establecido la conexión Wifi y se han configurado las redes tanto para el servidor como para los clientes, el siguiente paso crítico es asignar direcciones IP estáticas a cada dispositivo en la red. Esto es esencial para garantizar una comunicación fluida y sin interrupciones entre los diferentes componentes del sistema. La asignación de direcciones IP se realiza de la siguiente manera:

Servidor:

Se asigna una dirección IP estática que actuará como punto central de la red. Esto permite que otros dispositivos se conecten y se comuniquen con el servidor de manera eficiente.

```
IPAddress staticIP (192, 168, 4, 1)
```

Cliente 2:

Cada cliente en la red también le vamos a asignar una dirección IP, para garantizar la identificación y la comunicación adecuada. Para el Cliente 2, se asigna la siguiente dirección IP:

```
IPAddress staticIP (192, 168, 4, 2)
```

Cliente 3:

Del mismo modo el cliente 3 en la red se asigna una única dirección IP para evitar conflictos y fallos en la comunicación.

```
IPAddress staticIP (192, 168, 4, 3)
```

4. Definición de Modo de trabajo

Una vez configuradas las direcciones IP y establecidas las conexiones WiFi, es esencial definir el modo de trabajo de cada dispositivo en la red. Esta etapa determina el papel que desempeñará cada uno, ya sea como un punto de acceso (Access Point) o como un cliente estacionario (Estación). La definición del modo de trabajo se realiza de la siguiente manera:

Access Point / Servidor:

Para configurar el dispositivo como un punto de acceso (Access Point) o servidor, y permitir así que otros dispositivos se conecten a él, se debe utilizar la siguiente instrucción:

```
WiFi.softAP(ssid, password),
```

Estación / Clientes:

Por otro lado, para configurar un dispositivo como estación o cliente que se conecta al punto de acceso, se utiliza la siguiente instrucción:

```
WiFi.mode(WIFI_STA).
```

5. Envío y Recepción de Datos

Aquí se detallan los pasos necesarios para enviar y recibir datos entre los diferentes nodos de la red WiFi:

Para que el Nodo 1 trabaje como servidor:

El Nodo 1 asume el papel de servidor, lo que significa que estará a la espera de conexiones entrantes de los nodos cliente. Para lograr esto, se declara un objeto de tipo WiFiServer y se inicia en un puerto específico como lo definimos a continuación:

```
WiFiServer server;  
server.begin(22333) // 22340 y 22350 puertos utilizados
```

Para Nodo 2 y Nodo 3 trabaje como Cliente:

Los Nodos 2 y 3 actúan como clientes que se conectan al servidor (Nodo 1) para enviar y recibir datos. Para ello, se declaran objetos de la siguiente manera:

```
WiFiClient client2  
WiFiClient client3
```

Para almacenar el valor de la Potencia de señal:

Para obtener información sobre la potencia de la señal WiFi recibida, se puede utilizar la función WiFi.RSSI(), que devuelve el valor de la potencia de la señal en dBm. Por ejemplo:

```
int Rssi = WiFi.RSSI();
```

Para el Envío de datos vía Wifi :

Para enviar datos desde un cliente (por ejemplo, Nodo 2) al servidor, se utiliza la instrucción println(), se realizó de la siguiente manera:

```
client2.println( );
```

Recepción de datos:

Para recibir datos en el servidor desde un cliente (por ejemplo, Nodo 3), se lo realiza de la siguiente manera utilizando la siguiente línea:

```
String mensaje = client3.readStringUntil('\r');
```

Cierre de comunicación:

Después de finalizar la comunicación entre el cliente y el servidor, es importante cerrar la conexión para liberar los recursos. Lo ejecutamos de la siguiente forma:

```
client2.stop();
```

Todos estos pasos nos permiten realizar una comunicación exitosa entre los nodos de la red Wifi facilitando el intercambio de datos sin problemas ni conflictos .

1.3.2 Configuración BLE

Para la estructuración de la tecnología BLE, se llevaron a cabo una serie de instrucciones que permiten el funcionamiento adecuado de la comunicación inalámbrica entre dispositivos. Estas instrucciones incluyen:

1. Incluir las Librerías específicas para la tecnología BLE:

Es fundamental incorporar las librerías que maneja la placa de desarrollo para obtener las herramientas necesarias para implementar la funcionalidad BLE. Esto se logró agregando las siguientes librerías:

```
#include <BLEDevice.h>
#include <BLEUtils.h>
#include <BLEServer.h>
#include "BLEScan.h"
#include <BLECharacteristic.h>
#include <queue>
```

2. Asignación de los identificadores únicos UUID para los servicios y definición de las características que asignamos a cada nodo (lectura / escritura):

Cada servicio y característica en una red BLE requiere un identificador único conocido como UUID. Estos UUIDs aseguran que los dispositivos puedan identificar y comunicarse entre sí de manera efectiva. Aquí se definen los UUIDs para los servicios y características:

Servidor

Este UUID se asigna al servicio común que proporciona el servidor BLE.

```
#define COMMON_SERVICE_UUID "972cea99-a00c-4573-8bad-7503e3d4d9ed"
```

Nodo 2

Este UUID identifica la característica específica asignada al Nodo 2 para lectura y escritura de datos.

```
#define CHARACTERISTIC_UUID_C2 "7cb1051d-b189-4ec3-af36-2893802ebab6"
```

Nodo 3

Similar al Nodo 2, este UUID identifica la característica específica asignada al Nodo 3 para lectura y escritura de datos.

```
#define CHARACTERISTIC_UUID_C3 "6cb1051d-b189-4ec3-af36-2893802ebab7"
```

Una vez definidos sabemos que estos identificadores únicos garantizan seguridad y una correcta comunicación entre los dispositivos BLE en la red.

3. Declaramos el servidor BLE y sus características:

Para establecer la infraestructura de comunicación BLE, debemos declarar el servidor y las características de cada nodo de la red .

```
BLEServer *pServer;
BLECharacteristic *pCharacteristic_C2;
BLECharacteristic *pCharacteristic_C3;
```

4. Creación del Dispositivo BLE con el UUID definido en la variable asignada:

En este punto implica la creación del dispositivo BLE utilizando el nombre y UUID definidos previamente. Esto se realiza mediante una serie de instrucciones que incluyen la inicialización del dispositivo, la creación del servidor y la configuración de los servicios:

```
BLEDevice::init("ServerNodo1");
pServer = BLEDevice::createServer();
pServer->setCallbacks(new MyServerCallbacks());
BLEService* pService = pServer->createService(COMMON_SERVICE_UUID);
```

5. Propiedades y Características que le asignamos al Nodo 2 y al Nodo 3:

Para cada nodo de la red, se definen las propiedades y características necesarias para la comunicación. Esto incluye la creación de las características con los UUIDs previamente definidos y define las propiedades de cada característica:

```
pCharacteristic_C2 = pService->createCharacteristic(
CHARACTERISTIC_UUID_C2,
  BLECharacteristic::PROPERTY_READ |
  BLECharacteristic::PROPERTY_WRITE |
  BLECharacteristic::PROPERTY_NOTIFY
);

pCharacteristic_C3 = pService->createCharacteristic (
CHARACTERISTIC_UUID_C3,
  BLECharacteristic::PROPERTY_READ |
  BLECharacteristic::PROPERTY_WRITE |
  BLECharacteristic::PROPERTY_NOTIFY
);
```

Estas líneas de código crean las características asociadas a cada nodo, permitiendo la lectura, escritura y notificación de datos entre los dispositivos de la red BLE.

6. Anuncio definido que mostrará el Servidor a los nodos de la red:

Finalmente, definimos el anuncio que será transmitido por el servidor a los nodos de la red, dando información sobre la identificación y dirección del servidor:

```
pCharacteristic_C->setValue("[Server_NODO1][Address:F4:12:FA:4E:80:E8]");
pService->start();
```

Estas líneas establecen el valor de la característica asociada al servidor y ponen en marcha el servicio, permitiendo así que el servidor BLE comience a anunciar su presencia a los dispositivos de la red.

1.3.3 Configuración LoRA

Para poder iniciar la comunicación LoRa, y la transmisión de datos entre los nodos de la red se realizaron las siguientes instrucciones:

1. Selección de Librerías específicas para tecnología LoRA:

Primero debemos agregar las librerías propias para el manejo de la comunicación LoRa que utiliza la placa de desarrollo:

```
#include "LoRaWan_APP.h" // Librerías LORA
#include "Arduino.h"      // librerías Arduino compatible con ESP32 en LoRa
```

2. Definir parámetros específicos para el módulo adquirido:

Cada módulo LoRa tiene parámetros a ser configurados para su correcto funcionamiento, que se definen a continuación:

```
#define NODE2_FREQUENCY 868000000 // Frecuencia del nodo 2 en 868 MHz
#define NODE3_FREQUENCY 869000000 // Frecuencia del nodo 3 en 869 MHz
#define SERVER_FREQUENCY 868000000 // Frecuencia del nodo 1 (Servidor)
#define COMUNICACION_LORA_NODO3-NODO2 [FREQ 870000000 HZ]
#define TX_OUTPUT_POWER 17 // Potencia de transmisión en dBm Max 22
#define LORA_SPREADING_FACTOR 10 // Factor de propagación [SF7..SF12] 7
// es velocidad alta corto alcance elegí SF10 y -130dbm sensibilidad media
// potencia
#define LORA_CODINGRATE 1 // Tasa de codificación [1: 4/5] 4/5
// significa por cada 5 bits transmitidos, 4 bits información útil y 1 bit
// detección y corrección de errores.
#define LORA_PREAMBLE_LENGTH 8 // Longitud de preámbulo
#define RX_TIMEOUT_VALUE 3000 // tiempo de espera de recepción de nodos
#define Message 30 // Tamaño del mensaje en caracteres
```

3. Habilitar, el modo LoRa con las siguientes instrucciones:

Para habilitar el modo LoRa y configurar la comunicación entre los nodos, se utilizan las siguientes instrucciones:

```
Mcu.begin();
Communication_Notify.TxDone = Transmit_LoRa;
Communication_Notify.TxTimeout = Wait_Time;
Communication_Notify.RxDone = Receive_LoRa;
Radio.Init(&Communication_Notify); // Nombre de la comunicación
```

Estas instrucciones inicializan el microcontrolador (Mcu), configuran las notificaciones para la transmisión (TxDone) y recepción (RxDone) de datos.

4. Configuración de los parámetros de lora para la transmisión TX y recepción RX de datos:

Se establecen los parámetros de configuración tanto para la transmisión como para la recepción de datos LoRa:

```
Radio.SetTxConfig (MODEM_LORA, TX_OUTPUT_POWER, 0, LORA_BANDWIDTH,  
LORA_SPREADING_FACTOR, LORA_CODINGRATE, LORA_PREAMBLE_LENGTH,  
LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON, true, 0, 0, LORA_IQ_INVERSION_ON, 3000);
```

```
Radio.SetRxConfig (MODEM_LORA, LORA_BANDWIDTH, LORA_SPREADING_FACTOR,  
LORA_CODINGRATE, 0, LORA_PREAMBLE_LENGTH, LORA_SYMBOL_TIMEOUT,  
LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON, 0, true, 0, 0, LORA_IQ_INVERSION_ON, true);
```

Estas instrucciones establecen la configuración tanto para la transmisión como para la recepción de datos, especificando parámetros como la potencia de salida, el ancho de banda, el factor de propagación, la tasa de codificación, entre otros.

5. Definición del rango frecuencia en el módulo y también mensaje asignado a transmitir:

Estas instrucciones establecen el canal de frecuencia en el módulo LoRa, definen el mensaje a transmitir y envían el mensaje a través del módulo LoRa. Este proceso permite la comunicación entre los nodos utilizando la tecnología LoRa.

```
Radio.SetChannel(NODE2_FREQUENCY);  
sprintf(TxMessage, "[Hola soy SERVIDOR_Nodo2]");  
Serial.printf("\r\nEnviando Mensaje \"%s\"", TxMessage);  
Radio.Send((uint8_t *)TxMessage, strlen(TxMessage));
```

Capítulo 5

5. Pruebas

5.1 Prueba de la Red heterogénea

En la ciudad de Alzira, específicamente en la Plaza de la Generalidad se realizaron las pruebas utilizando la aplicación "Mapas de Distancia" para demostrar la ubicación y la distancia entre los nodos, como podemos ver en la Figura 18.

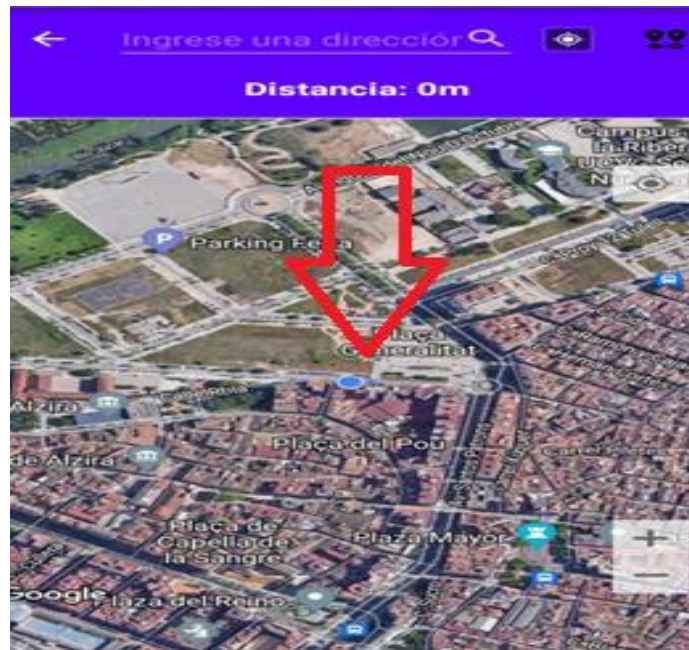


Figura 18 Ubicación donde se realizan las Pruebas

5.1.2 Selección BLE

Al iniciar el código, se selecciona como primera opción el modo de transmisión BLE. Procedemos a realizar las pruebas y a obtener datos para el análisis de la comunicación. En la Figura 19, podemos ver al Servidor (Nodo 1) anunciando el servicio BLE con el [ServiceUUID: 972cea99-a00c-4573-8bad-7503e3d4d9ed], que interactuará con el Nodo 2.

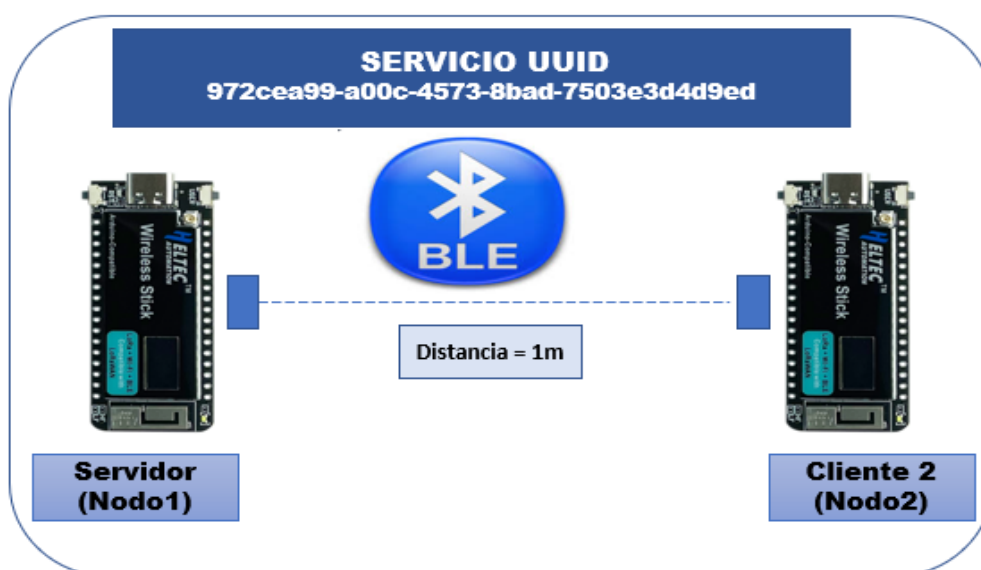
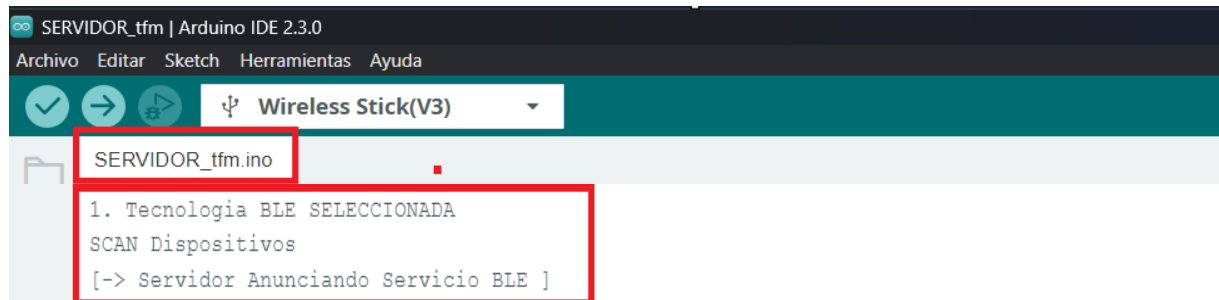


Figura 19 Parametros para Tecnologia BLE

En la Figura 20 observamos al Servidor seleccionando la tecnología BLE, según la programación del algoritmo realizada, y quedándose a la espera de sus nodos clientes. Es importante destacar que los nodos clientes detectarán al servidor BLE mediante el identificador UUID previamente descrito. Una vez que lo encuentran, presentarán el siguiente mensaje:

[Servidor BLE encontrado: Name: Server_Nodo1, Address: f4:12:fa:66:3e:d1]

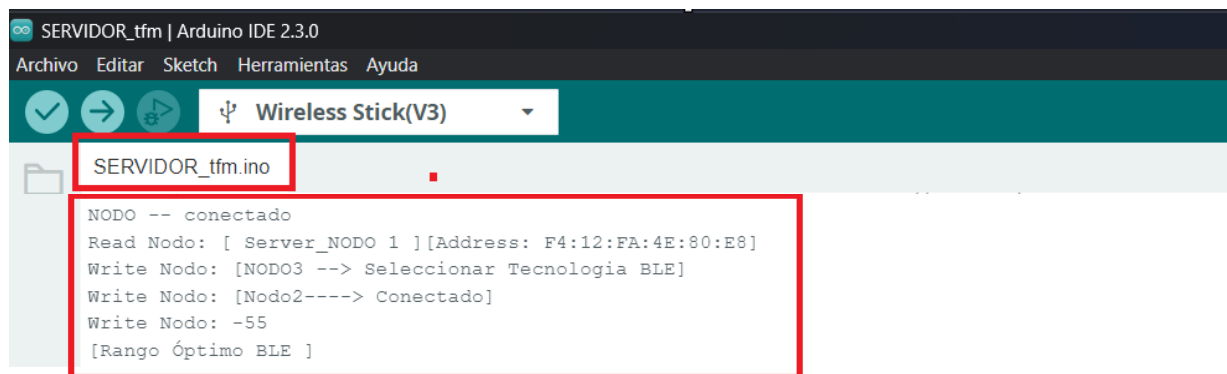
Posteriormente, el servidor inicia el monitoreo de la comunicación y comienza a recibir intercambios de mensajes y el valor RSSI enviado por los nodos, ver la Figura 21.



The screenshot shows the Arduino IDE interface with the file 'SERVIDOR_tfm.ino' open. The code in the editor is as follows:

```
1. Tecnologia BLE SELECCIONADA
SCAN Dispositivos
[-> Servidor Anunciando Servicio BLE ]
```

Figura 20 ServerNodo1 Selección Tecnología BLE



The screenshot shows the Arduino IDE interface with the file 'SERVIDOR_tfm.ino' open. The code in the editor is as follows:

```
NODO -- conectado
Read Nodo: [ Server_NODO 1 ][Address: F4:12:FA:4E:80:E8]
Write Nodo: [NODO3 --> Seleccionar Tecnología BLE]
Write Nodo: [Nodo2----> Conectado]
Write Nodo: -55
[Rango Óptimo BLE ]
```

Figura 21 Monitoreo de ServerNodo1- Recepcion de mensajes

Para analizar el comportamiento del RSSI y determinar el alcance y la cobertura con esta tecnología, tomamos los valores capturados plasmados en la Tabla 2.

Distancia (m)	RSSI (dbm)
0	33
1	55
4	58
6	61
8	62
9	80
10	94

Tabla 2 : RSSI de acuerdo a la distancia en BLE

Es importante destacar que los resultados están disponibles para su revisión en la Figura 22, donde se evidencia que más allá de los 10 metros de distancia ya no contamos con cobertura.

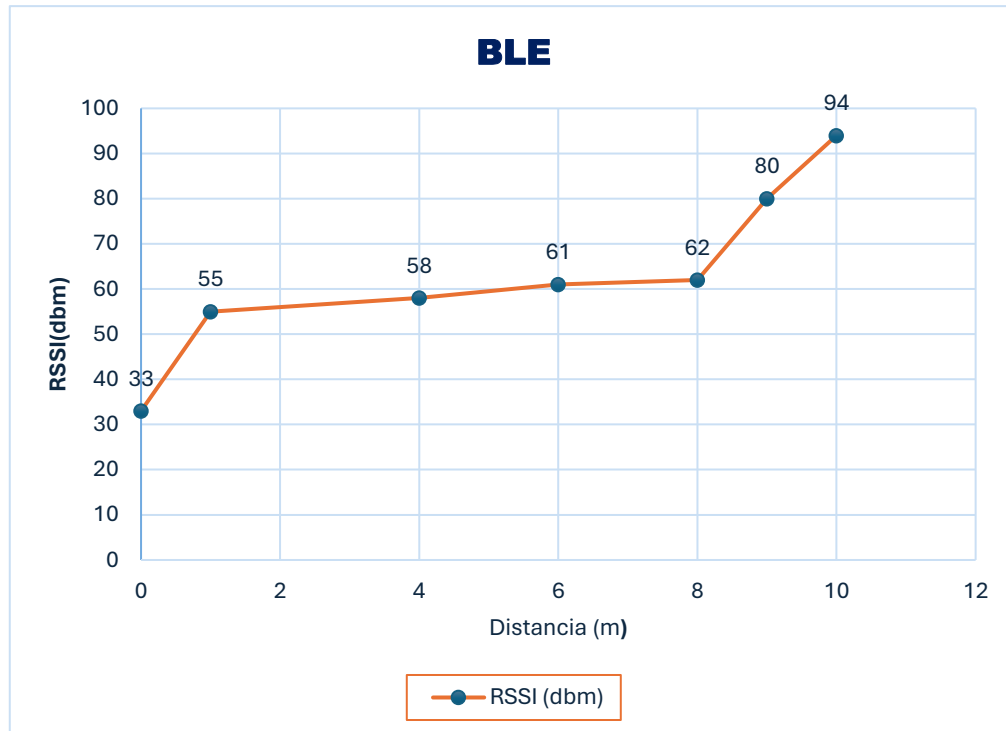


Figura 22 Comportamiento de RSSI en tecnología BLE

Con ayuda de la aplicación Acrylic BLE Analyzer, pudimos visualizar si el servidor, en este caso ServerNodo1, estaba anunciando su servicio BLE. Esto se observa en la Figura 23, que muestra su dirección MAC, su RSSI, y el paquete de datos que anuncia, como se puede ver en la Figura 24.



Figura 23 ServerNodo1 anunciando su servicio

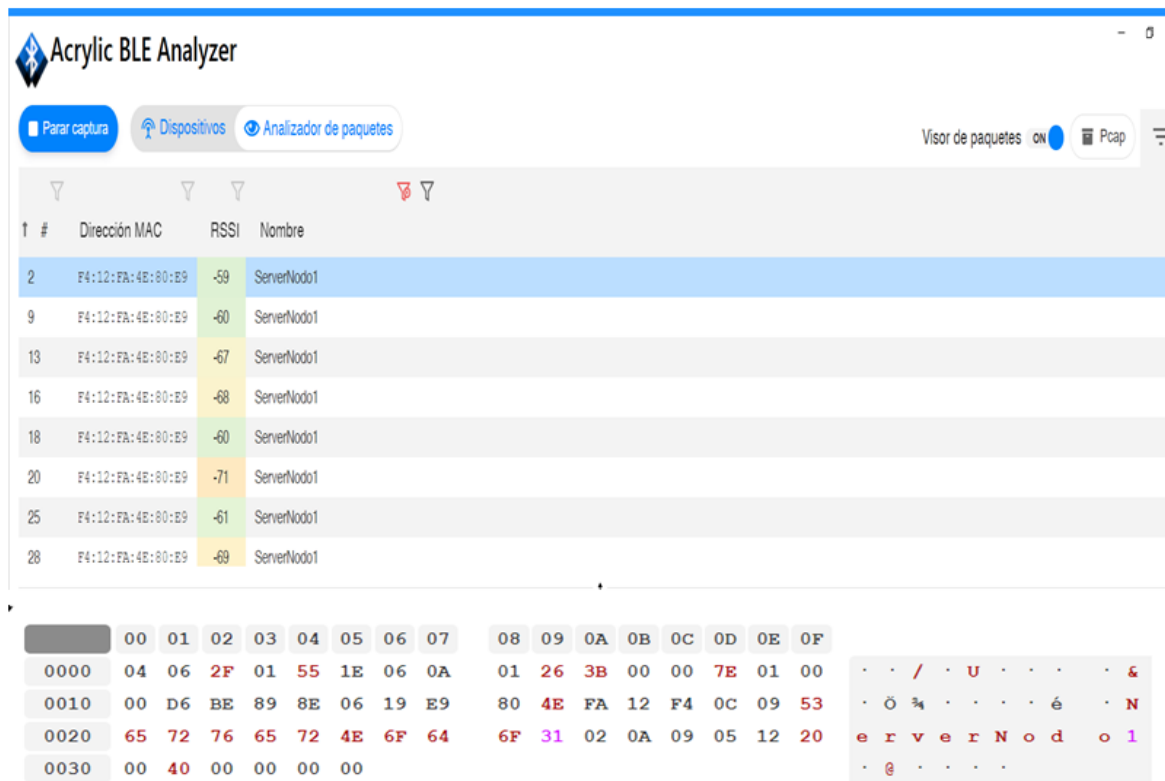


Figura 24 Captura de datos en Servicio BLE

Tras capturar el tráfico de la comunicación BLE durante un lapso de 5 minutos, podemos informar que se registró un total de 7768 paquetes, con tamaños entre 32 y 63 bytes y una media de 56.9 bytes. La Figura 25 ilustra el tráfico de la comunicación observado.

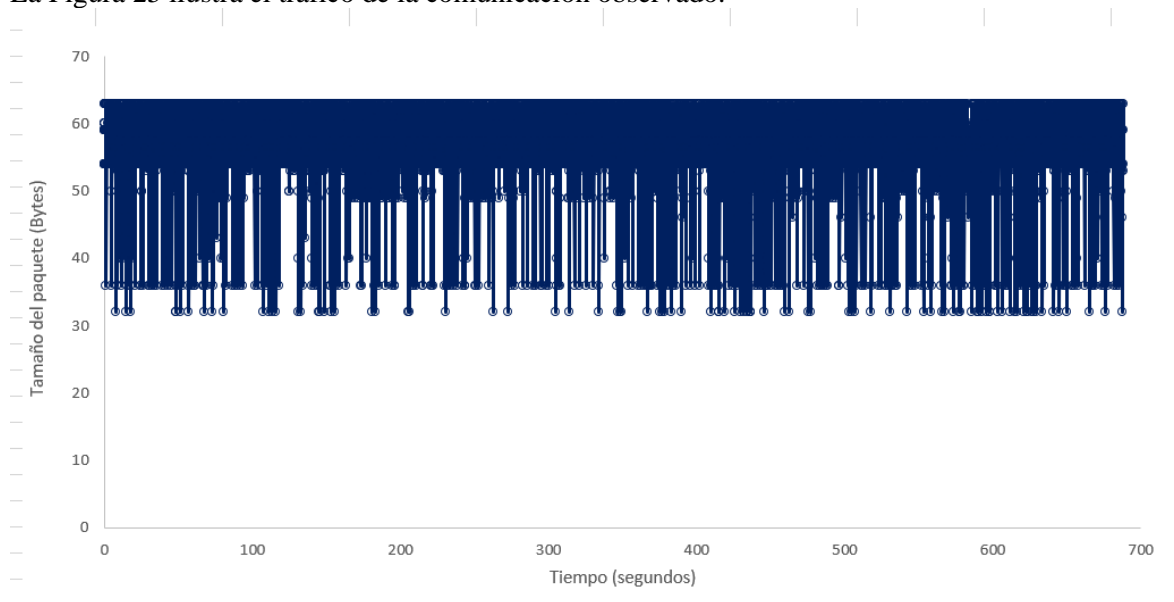


Figura 25 Tráfico Capturado de la Comunicación BLE

5.1.3 Selección WIFI

Durante la prueba en la que se habilitó la selección para transmisión WiFi, se configuraron los siguientes parámetros, los cuales pueden observarse en la Figura 26 para la captura de datos y su posterior análisis. Asimismo, la codificación del algoritmo y la creación de la red, incluyendo la dirección IP asignada al servidor, se muestran en la Figura 27 mediante el monitor serie.

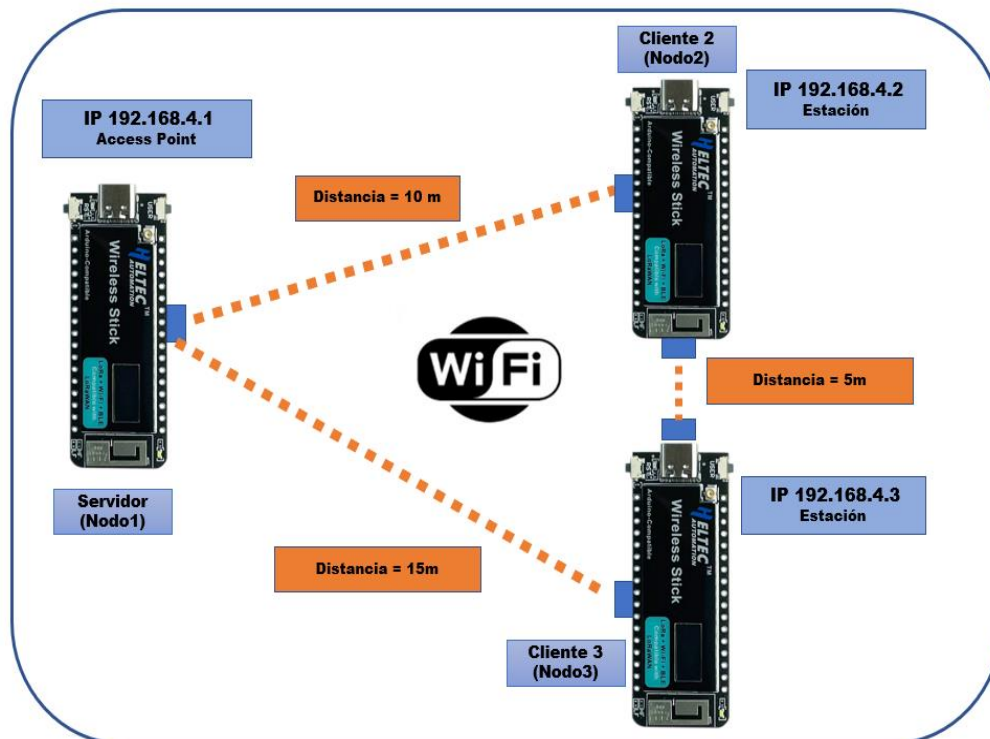


Figura 26 Parámetros de prueba Wifi

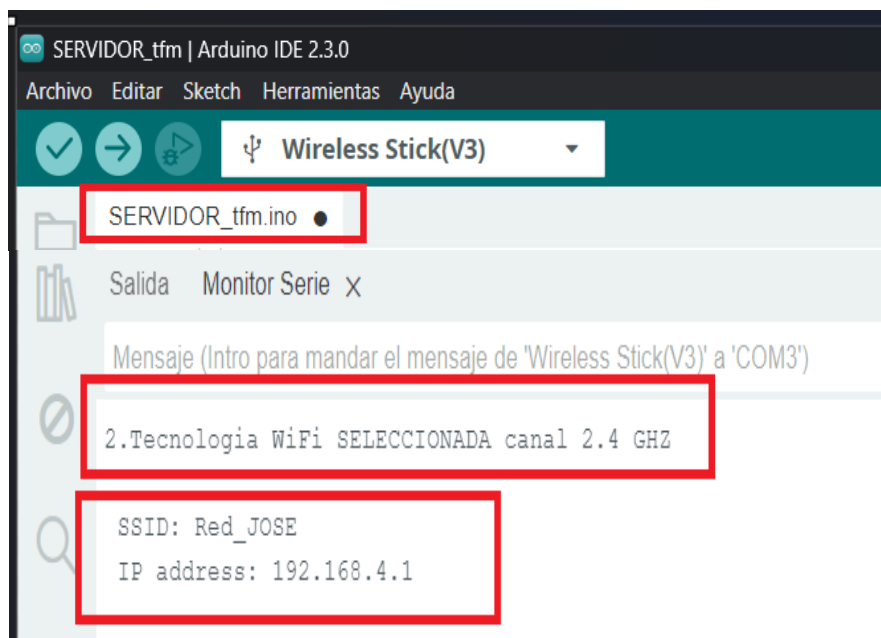


Figura 27 Selección a Tecnología Wifi

También se observa en la Figura 28 el intercambio puntual de mensajes entre el Nodo 2 y el Nodo 3, esta interacción confirma de que los nodos operan utilizando la tecnología WiFi, y el Nodo 3 envía una respuesta tras recibir un mensaje del Nodo 2.

```

2.Tecnología WiFi SELECCIONADA
. SSID: Red_JOSE
Client3 IP address: 192.168.4.3
NODO 3 /Conectado a red1
Mensaje recibido de NODO2: NODO 3 TRABAJAR EN TECNOLOGIA WIFI

```

Figura 28 Intercambio de Mensajes entre Nodo2 y Nodo3

Una vez creada la red, utilizamos la aplicación Wifi Monitor para verificar aspectos generales de la red creada como Red_JOSE, como se detalla en la Figura 29.

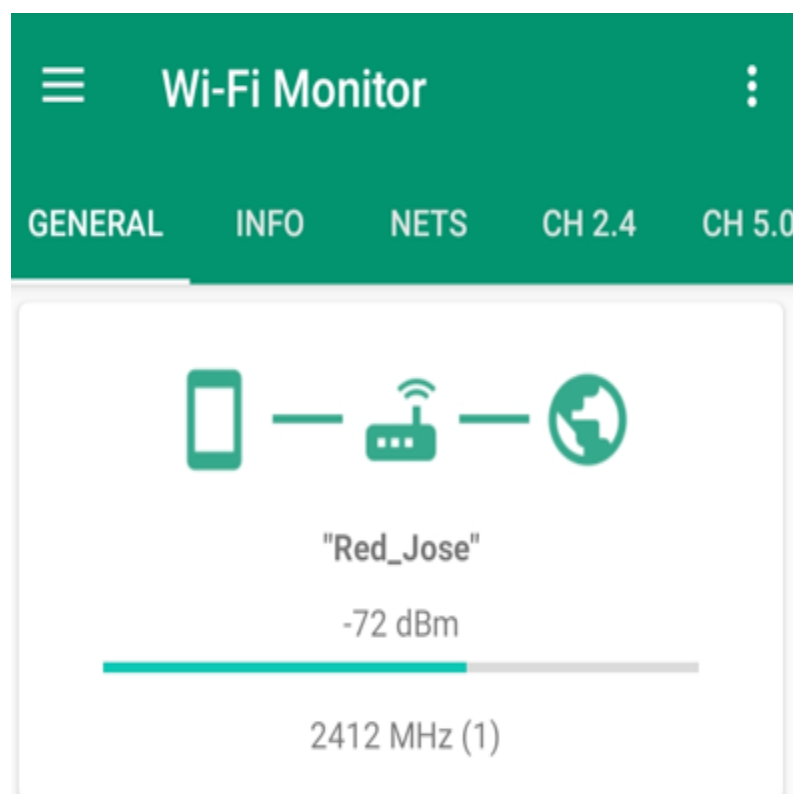


Figura 29 RSSI de la Red Wifi

Utilizando el programa Wireshark para capturar el tráfico, podemos observar los puertos de comunicación utilizados, así como las direcciones IP asignadas, detallados en la Tabla 3.

Nodos	IP	Dirección Mac
Nodo1(Servidor)	192.168.4.1	f4:12:fa:66:3e:d0
Nodo 2	192.168.4.2	f4:12:fa:66:3f:14
Nodo3	192.168.4.3	f4:12:fa:4e:80:e8

Tabla 3 : Identificación de los Nodos en la red

En la Figura 30, se capturó el tráfico desde un portátil de marca Lenovo equipado con un adaptador Intel® Wireless-AC9560 WIFI. Podemos ver que el puerto 22350 es utilizado por la dirección 192.168.4.3 del Nodo 3, que se emplea cuando este se comunica con el Nodo 2. También observamos que el puerto 22333 es el más utilizado en la comunicación.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
50	12.648087	192.168.4.1	192.168.4.2	TCP	54	22333 → 61480 [RST, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=28694 Len=0
74	13.087294	192.168.4.2	192.168.1.129	TCP	66	60359 → 8009 [SYN] Seq=0 Win=64240 Len=0 MSS=1460 WS=256 SACK_PERM
235	55.131219	192.168.4.1	192.168.4.2	TCP	54	22333 → 63679 [RST, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=28694 Len=0
418	96.697301	192.168.4.1	192.168.4.2	TCP	54	22333 → 49419 [RST, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=28694 Len=0
599	141.763573	192.168.4.1	192.168.4.2	TCP	54	22333 → 51943 [RST, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=28694 Len=0
779	186.160850	192.168.4.1	192.168.4.2	TCP	54	22333 → 54358 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=5739 Len=0
1015	273.116344	192.168.4.3	192.168.4.2	TCP	54	22350 → 54847 [RST, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=28694 Len=0
1034	275.893301	192.168.4.3	192.168.4.2	TCP	54	22350 → 54847 [RST, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=28694 Len=0
1041	276.081199	192.168.4.3	192.168.4.2	TCP	54	22350 → 54848 [RST, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=28694 Len=0
1045	278.861908	192.168.4.3	192.168.4.2	TCP	54	22350 → 54848 [RST, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=28694 Len=0
1136	317.890045	192.168.4.1	192.168.4.2	TCP	54	22333 → 56958 [RST, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=28694 Len=0
1223	344.990574	192.168.4.1	192.168.4.2	TCP	54	22333 → 57394 [RST, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=28694 Len=0

Figura 30 Capturas de tráfico con wireshark

Siguiendo con el análisis de los datos capturados vamos a ver en la Figura 31, un gráfico que abarca un período de 800 segundos, lo cual nos brinda una visión detallada de la comunicación Wifi y el tráfico generado. Este gráfico no solo muestra la actividad de la red, sino que también proporciona datos sobre el número de paquetes capturados, permitiéndonos analizar más a fondo el rendimiento de la red en ese lapso.

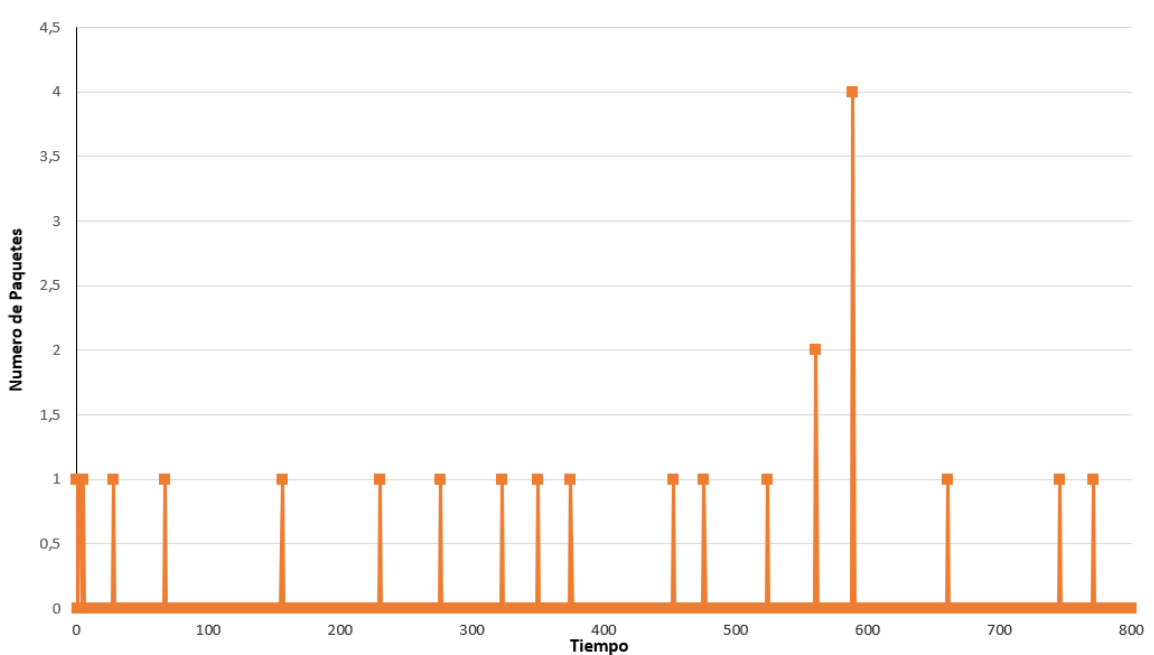


Figura 31 Grafico de comunicación en wifi

En la Figura 32, mostramos el flujo de mensajes en la comunicación WiFi después de haber establecido la red. El proceso comienza con una comunicación puntual entre el Nodo 3 y el Nodo 2, donde se envían mensajes para coordinar el funcionamiento utilizando la tecnología WiFi. Es importante mencionar que esta comunicación se lleva a cabo a través del puerto 22350. Posteriormente, la comunicación se traslada al puerto 22333, donde se envían y reciben mensajes de monitoreo al servidor.



Figura 32 Diagrama de flujo de negociacion de nodos

Con la aplicación Wireshark, realizamos un resumen de los protocolos implicados en la comunicación WiFi y los detallamos en la Tabla 4, junto con la cantidad de tráfico generado.

Protocolo	Dirección	Total
ARP	Espressif_66:3e:d0	5536
	Espressif_66:3f:14	14278
	f6:12:fa:4e:80:e8	29169
	Intel_94:98:c8	92149
TCP	192.168.4.1	4440
	192.168.4.2	74
	192.168.4.3	4135

Tabla 4 : Protocolos y direcciones Obtenidas en la comunicación

En la Figura 33, se incluye un resumen de los protocolos obtenidos durante la captura de la comunicación. En esta tabla, se detallan los protocolos, las direcciones asociadas y el total de veces que aparecen durante la captura:

Esta información nos ayuda a visualizar los protocolos y las direcciones involucradas en la comunicación capturada, para analizar y entender el tráfico de nuestra red.

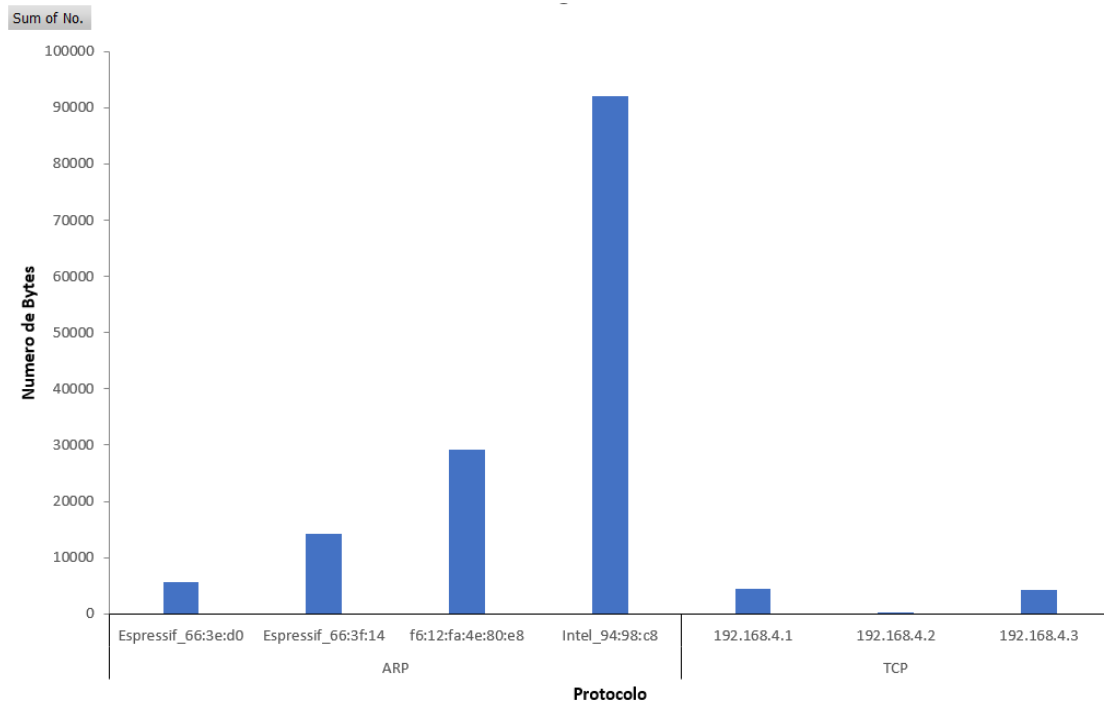


Figura 33 Protocolos capturados en comunicación Wifi

Es importante señalar que durante la hora pico, a las 19:28 PM, se observó una congestión significativa, revisar la Figura 34. Concluyendo que el alcance de la red queda limitado, lo que lleva a la selección de la tecnología que ofrezca mayor cobertura.

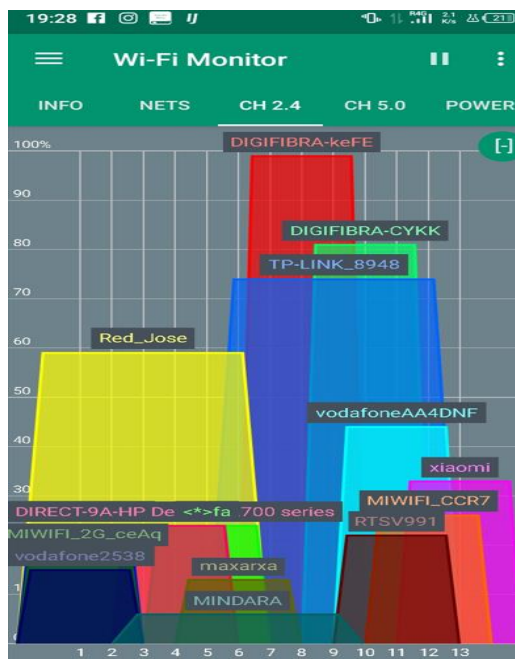


Figura 34 Congestión Wifi canal 2.4 GHZ

5.1.4 Selección LoRa

En situaciones donde la conexión WiFi ya no puede tener una comunicación eficiente, ya sea por que tiene su espectro electromagnético congestionado o existen barreras físicas que obstaculizan la comunicación, se recurre a LoRa, una fortaleza del módulo Wireless Stick V3.

Al haber diseñado esta opción de comunicación LoRa en el módulo Wireless Stick V3, se potencia su versatilidad y utilidad en diferentes entornos, desde aplicaciones industriales hasta soluciones en entornos urbanos y rurales.

Cabe señalar que los parámetros que utilizamos en las pruebas de desempeño de esta tecnología se detallan en la Figura 35.

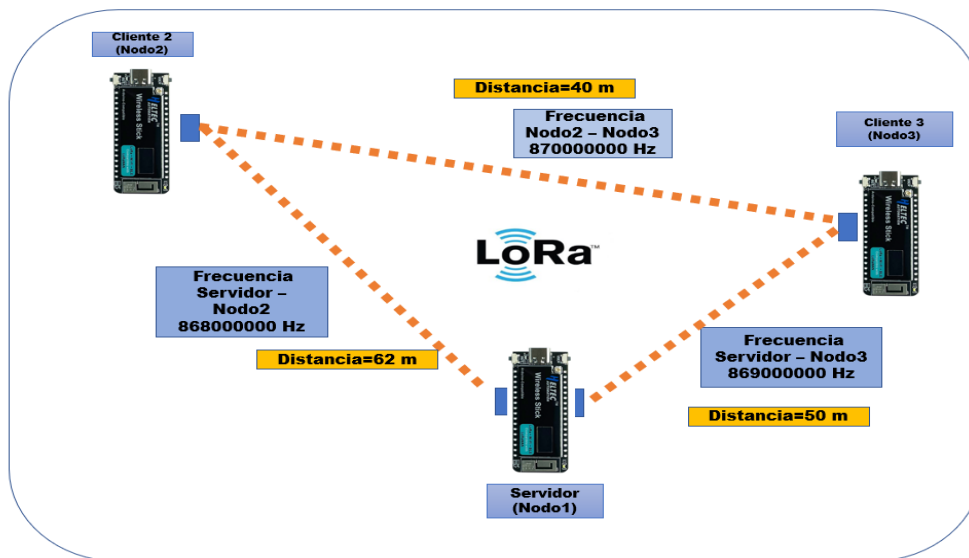


Figura 35 Parámetros de pruebas en Tecnología LoRa

Al seleccionar esta tecnología, empieza un proceso en el servidor que inicia con el envío de una notificación a todos los nodos dentro del sistema, dando la orden para realizar la transición hacia la utilización de LoRa, tal como se ilustra en detalle en la Figura 36. Este cambio ya nos muestra la gestión dinámica de la red, y la capacidad de adaptación a diferentes tecnologías, impidiendo así que se corte la comunicación en la red en todo momento.

Además en este proceso, se lleva a cabo un intercambio de mensajes entre los nodos que permite evaluar el rendimiento y la fiabilidad de la comunicación LoRa en tiempo real, identificando posibles congestiones, interferencias o pérdidas de datos que puedan surgir durante la operación normal del sistema.

El intercambio de mensajes entre los nodos, facilitado por la tecnología LoRa, se convierte en un aspecto central del funcionamiento de la red, sirviendo como una fuente vital de información para los procesos de diagnóstico y optimización de la red.

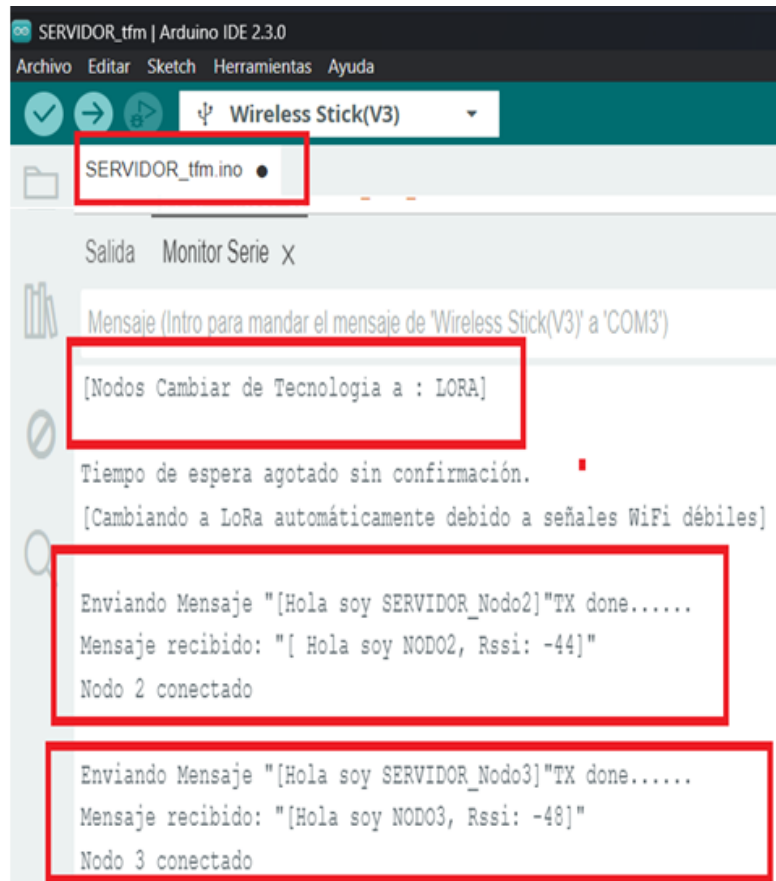


Figura 36 Comunicación Servidor -Nodos en Tecnología LoRa

Realizamos un monitoreo previo de la cobertura de los módulos Wireless Stick V3, y los valores obtenidos los detallamos en la Tabla 5, con esto analizar el comportamiento del RSSI y determinar el máximo alcance que podríamos alcanzar con estos módulos.

Distancia (m)	RSSI (dbm)
0	28
10	32
30	40
50	44
62	48
80	67
100	70
163	100

Tabla 5 : Valores de RSSI en Función de la Distancia para la Tecnología LoRa

Los resultados se pueden revisar en la Figura 37, donde nos damos cuenta que obtenemos el alcance máximo a los 163 metros, luego de esto se pierde la conexión.

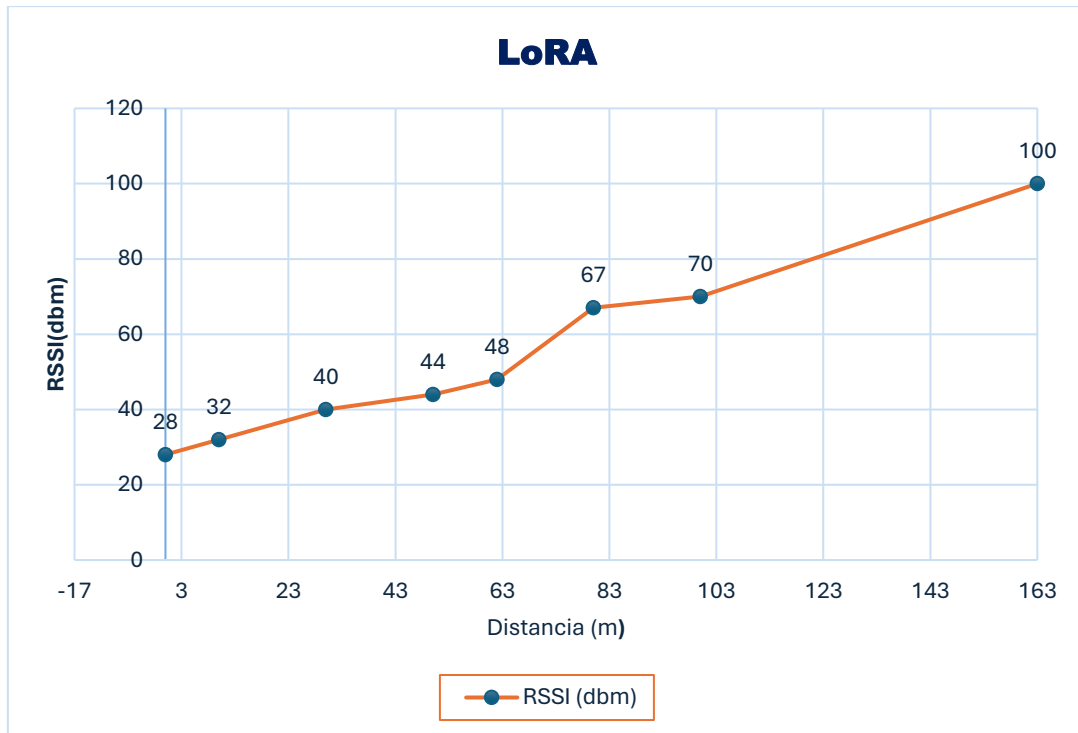


Figura 37 Comportamiento de RSSI en Tecnología LoRa

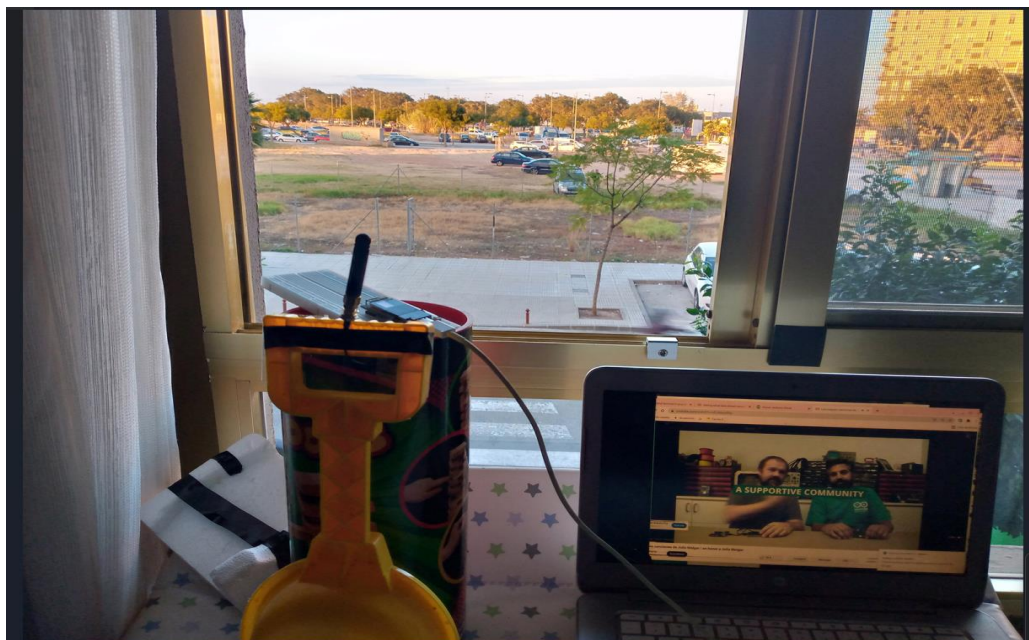


Figura 38 Pruebas en Tecnología LoRa

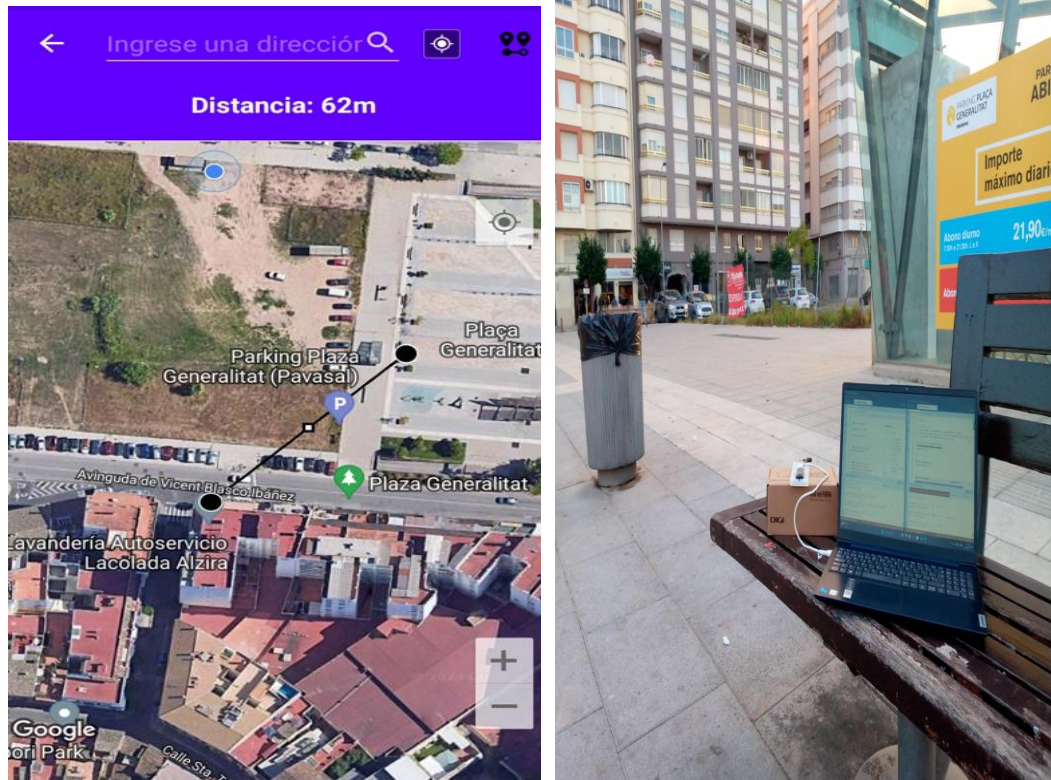


Figura 39 Prueba de Alcance 62 metros con selección LoRa

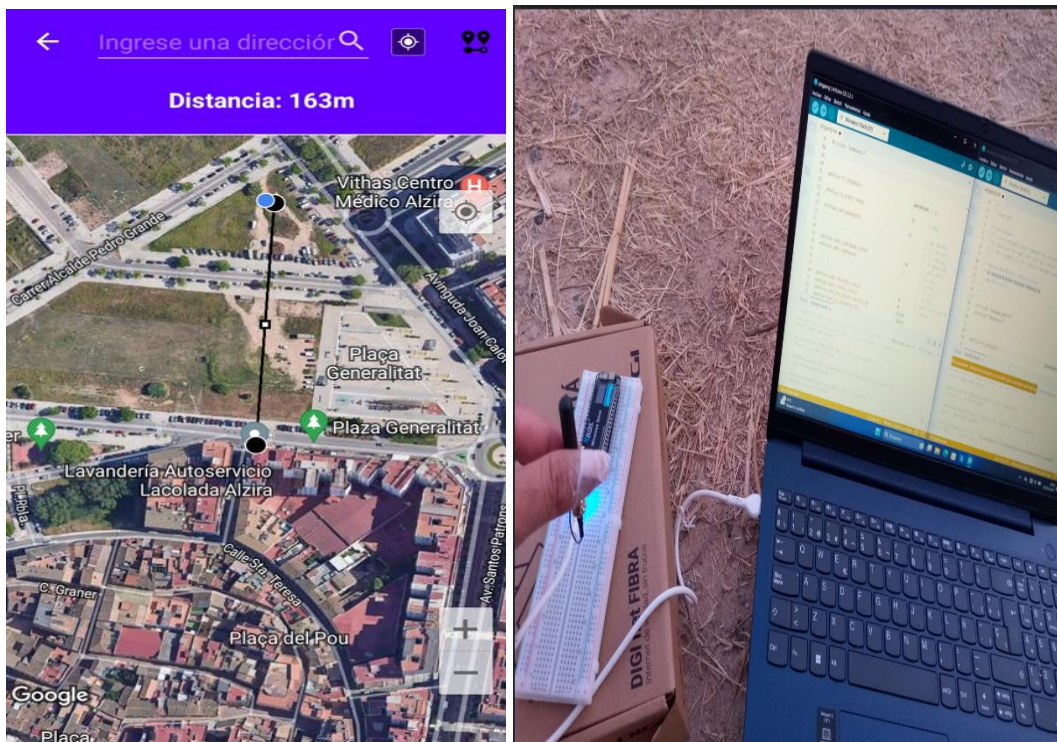


Figura 40 Prueba de Alcance de 163 metros con selección LoRa

Podemos comentar tras llevar a cabo las pruebas de cobertura utilizando la tecnología LoRa en los módulos Wireless Stick V3, como lo vemos en la Figura 38 y Figura 39 hemos podido realizar un análisis del comportamiento del RSSI en función de la distancia y nos han permitido ver la variación de la intensidad de la señal a medida que nos alejamos del punto de origen.

Hemos observado que el máximo alcance con estos módulos fue de 163 metros como lo vemos en la Figura 40, momento en el cual la conexión comienza a desaparecer. Este punto es importante ya que nos permite conocer las limitaciones y las capacidades de los módulos Wireless Stick V3 con tecnología LoRa en términos de alcance de la señal y cobertura de la red.

Con esta información, podemos concluir que, si bien la tecnología LoRa ofrece una notable mejora en la penetración de obstáculos y el alcance en comparación con las conexiones WiFi convencionales, sigue estando sujeta a limitaciones en cuanto a la distancia máxima alcanzada. Por lo tanto, es fundamental considerar estos datos al diseñar y desplegar redes basadas en LoRa, asegurando una cobertura óptima y una comunicación confiable dentro de los límites de alcance establecidos por estas pruebas.

Capítulo 6

6. Conclusiones

6.1 Cumplimiento del Objetivo

Como principal meta teníamos la implementación de una red heterogénea utilizando módulos ESP32, capaces de soportar tecnologías como Wifi, BLE y LoRa. A lo largo del proceso de desarrollo, hemos logrado con éxito implementar esta red, cumpliendo con el propósito de integrar las tecnologías inalámbricas mencionadas. Esto ha brindado flexibilidad a la red y la capacidad de adaptarse a situaciones emergentes.

6.2 Conclusiones

Primeramente vamos a resaltar sus ventajas y aplicaciones prácticas, indicando que la red permite optimizar el uso de recursos energéticos al seleccionar dinámicamente la tecnología más adecuada según las condiciones del entorno. Por ejemplo, en ambientes con alta congestión de redes Wifi, el sistema puede adaptarse automáticamente a tecnologías de baja energía como LoRa, asegurando así un consumo energético eficiente.

La capacidad de adaptación de la red heterogénea permite una mejor cobertura, cambiando automáticamente a otra tecnología disponible en casos de interferencias o pérdida de señal. En las pruebas realizadas se obtuvo que el alcance es de 20 metros con Wifi, donde se presentan problemas debido al congestionado canal de 2.4 GHz. En tecnología BLE, el alcance es de 8 a 10 metros, mientras que con LoRa se alcanzan sorprendentes 163 metros en entornos exteriores, mejorando significativamente la cobertura general del sistema.

En ambientes industriales, la red heterogénea puede desempeñar un papel crucial; por ejemplo, en una fábrica inteligente, la capacidad para transmitir datos a alta velocidad dentro de un área específica con WiFi, comunicación precisa entre dispositivos cercanos con BLE, y conexiones a larga distancia con LoRa, brinda un enfoque integral que satisface diversas demandas de comunicación. Estos ejemplos evidencian cómo la creación de una red heterogénea no solo incrementa la eficiencia operativa, sino que también abre nuevas oportunidades para aplicaciones específicas en diversos contextos.

En conclusión, el proyecto ofrece una solución de bajo coste que proporciona alternativas de comunicación para distancias con diferentes alcances, que no solo ofrece eficiencia energética, sino que también supera significativamente la congestión de canales.

6.3 Problemas encontrados y Como se han solucionado

Durante el desarrollo del proyecto se encontraron varios desafíos, especialmente en las pruebas de las tecnologías Wifi y BLE, donde se detectaron interferencias de señal y congestión de redes, particularmente en horas pico, afectando negativamente la calidad de la comunicación.

Solución: Implementamos en el algoritmo un umbral Wifi usando el parámetro RSSI para determinar la baja cobertura y así utilizar la alternativa de comunicación con la tecnología LoRa cuando fuera necesario.

Otro problema fue la sincronización entre nodos al cambiar de una tecnología a otra, lo que ocasionó retrasos en la transferencia de datos y la interrupción instantánea de la conexión.

Solución: Modificamos el algoritmo para que el servidor envíe notificaciones de cambios de tecnología, asegurando una transición segura y coordinada entre tecnologías.

También se presentaron dificultades con la selección autónoma de tecnologías basada en RSSI, lo que afectó el proceso deseado del sistema.

Solución: Tras realizar pruebas independientes para cada tecnología, definimos umbrales específicos para BLE y Wifi, que permiten predecir y adaptarse a cambios en las condiciones del entorno inalámbrico al comparar estos umbrales con el RSSI actual.

Por último, el uso de las tres tecnologías implicó un uso intensivo de la memoria, alcanzando un 94% del almacenamiento disponible, con las librerías Wifi y LoRa utilizando el 34% y las de BLE el 60%.

Solución: Realizamos ajustes en el algoritmo para optimizar el uso de la memoria, empleando solo las variables estrictamente necesarias y ejecutando procesos más cortos pero efectivos.

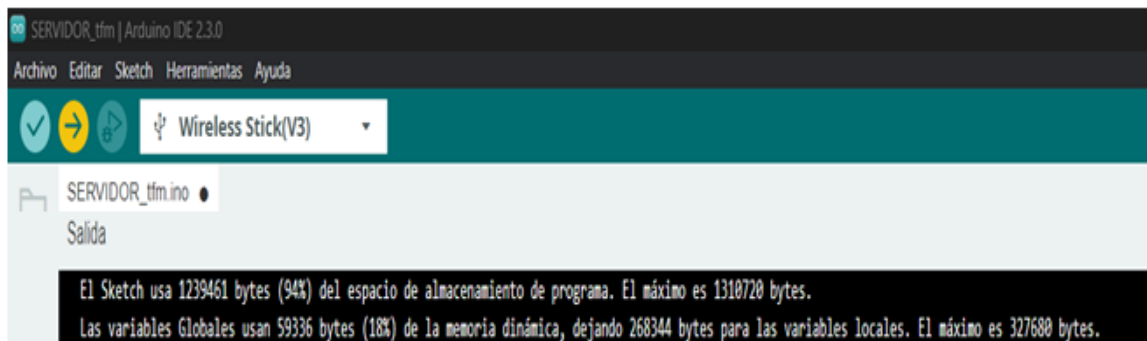


Figura 40 Cantidad de memoria utilizada en el código

6.4 Aportaciones personales

Mi contribución principal ha sido la elaboración y optimización de un algoritmo de selección autónoma de tecnologías Wifi, BLE y LoRa basado en el RSSI que es el indicador de intensidad de señal. Esto incrementa significativamente la capacidad del sistema para tomar decisiones adaptándose a diferentes entornos, lo que representa un avance crucial para la gestión eficiente de redes heterogéneas. Además, logré la integración efectiva de la placa de desarrollo Heltec Wireless Stick V3.

Realicé pruebas minuciosas para asegurar la compatibilidad y optimizar la configuración de la placa. Esto no solo permitió aprovechar al máximo las capacidades del hardware, sino que también mejoró el desempeño general del sistema, garantizando una implementación robusta y efectiva.

Por último, a través de este proyecto se proporcionó una solución de conexión rápida y fácil entre dispositivos a bajo costo. Este enfoque permite una adopción más amplia y accesible de tecnologías avanzadas en comunicaciones inalámbricas, beneficiando a una variedad de aplicaciones en distintos sectores.

6.5 Futuras líneas de trabajo

Procesamiento avanzado de señales y aplicaciones de inteligencia artificial: Profundizar en técnicas avanzadas de procesamiento de señales y explorar que beneficios puede contribuir, este enfoque podría mejorar significativamente la adaptabilidad y eficacia del sistema en entornos dinámicos y variados. [15]

Integración de nuevas tecnologías de comunicación: Evaluar la integración de tecnologías emergentes como el 5G, así como la inclusión de dispositivos controladores con mayor capacidad de memoria y comunicación de baja latencia. La actualización del sistema con estas tecnologías avanzadas permitiría mantener la red al día con los últimos avances tecnológicos.

Optimización de la gestión de canales congestionados: Investigar soluciones para los desafíos asociados con la congestión en el canal de 2.4 GHz. Desarrollar algoritmos específicos para la reducción de interferencias en este espectro podría mitigar los efectos negativos de la interferencia y optimizar la calidad de la señal y la estabilidad de la conexión. [16]

Aplicación de técnicas Remote Sensing para la gestión de la congestión: Las técnicas de teledetección podrían proporcionar datos valiosos sobre la distribución espacial de los nodos en una red, lo cual puede ser útil para desarrollar algoritmos que gestionen mejor la congestión en canales específicos como el de 2.4 GHz. El uso de datos de Remote Sensing puede ayudar a prever y mitigar problemas de interferencia a través de la planificación y optimización espacial de los nodos en la red.[17].

Estas líneas de investigación y desarrollo no solo extenderán la funcionalidad y el alcance del proyecto actual, sino que también contribuirán a la robustez y escalabilidad del sistema en entornos cada vez más demandantes.

7. Bibliografía

- [1] Christos Bouras^{1,2}, Apostolos Gkamas³, Vasileios Kokkinos², Nikolaos Papachristos “Using LoRa Technology for IoT Monitoring Systems” 2019 *IEEE 2019 10ª Conferencia Internacional sobre Redes del Futuro (NoF)*, DOI: 10.1109/NoF47743.2019.9014994
- [2] Octavio José Salcedo-Parra, Nelson Giovanni Agudelo-Cristancho, Desempeño RSSI de nodos sensores LoRa, BLE y WiFi en un sistema IOT interoperable - Colombia ORCID: 10000-0002-0767-8522, 20000-0002-1247-7696
- [3] Celia Garrido-Hidalgo, Diego Hortelano, Luis Roda-Sánchez, Teresa Olivares y M. Carmen Ruiz “Evaluando el Consumo de Redes BLE/LoRaWAN para IOT” 2017 DOI: 10.5281/zenodo.999267
- [4] Francisco José Ortiz Zaragoza, José Alfonso Vera Repullo, Joaquín Roca González, Manuel Jiménez Buendía, Óscar Martínez Mozos, “Sistema Heterogéneo para la Monitorización de la Actividad Diaria en el Hogar y el Bienestar de Personas Mayores” IETSII, Universidad Politécnica de Cartagena. Calle Dr. Fleming, s/n, Cartagena 2AASS, Örebro University, Suecia.
- [5] VENKAT MOHAN, S.; KASIVISWANATH, N. "Routing Protocols for Wireless Mesh Networks". International Journal of Scientific & Engineering Research, 2011, vol 2, núm. 8, pp. 42-46.
- [6] Katsuhiko Naito “A Survey on the Internet-of-Things: Standards, Challenges and Future Prospects” Information Processing Society of Japan, vol. 25, no. 1, 2017, DOI: 10.2197/ipsjip.25.23
- [7] Ting Zhang, Jiang Lu, Fei Hu. “Bluetooth Low Energy for Wearable Sensor-based Healthcare Systems”. 2014, Health Innovations and Point-of-Care Technologies Conference Seattle, Washington USA, DOI: 10.1109/HIC.2014.7038922.
- [8] Página web de MikoLora Disponible en: <https://www.mikolara.com/es/lora-and-wireless-technologies/>
- [9] Ala Al-Fuqaha, Mohsen Guizani, Fellow, Mehdi Mohammadi, Mohammed Aledhari and Moussa Ayyash, “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications” IEEE Photon. J., vol. 17, no. 4, 2015, Art no. 2444095.
- [10] Rahul N Biju; K M Akhil; Somnath Sinha “Monitoreo de dispositivos basado en RSSI con IEEE 802.15 en red de sensores inalámbricos”, 2022 4ª Conferencia Internacional on Inventive Research in Computing Applications, DOI: 10.1109/ICIRCA54612.2022.9985558.
- [11] Página web de Espressif: Disponible en:
https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [12] Página web de Heltec Automation. Disponible en: <https://heltec.org/project/wireless-stick-v3/>
- [13] Página web de Venco: Disponible en: <https://www.vencoel.com/que-es-lora-como-funciona-y-caracteristicas-principales/>
- [14] Amalia Nur Hikmah, C. Bambang Dwi Kuncoro “Sensor Fusion with Seven Parameters for Indoor Air Quality Monitoring System”, 2023 International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI) 20-21 September 2023, DOI: 10.1109/EECSI59885.2023.10295770.
- [15] B. Chandrasekaran, S. Gangadhar, and J. M. Conrad, “A survey of multisensor fusion techniques, architectures and methodologies,” Conf. Proc. - IEEE SOUTHEASTCON, pp. 1–8, 2017.
- [16] Paris Charalampou, Ioannis Giannoulakis, Emmanouil Kafetzakis, Efsthios D. Sykas, “Experimenting on LTE-U and WiFi coexistence” 2019 4.a Conferencia sobre automatización del diseño, ingeniería informática, redes informáticas y redes sociales del sudeste de Europa (SEEDA-CECNSM), DOI: 10.1109/SEEDA-CECNSM.2019.8908280

- [17] S. Khanal, K. Kc, J.P. Fulton, S. Shearer, and E. Ozkan, "Remote sensing in agriculture—accomplishments, limitations, and opportunities," *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 22, pp.3783