



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



BleTree: Protocolo para Extender la Cobertura de BLE en Redes de Sensores con Aplicación al Monitoreo de Calidad del Aire

TESIS PRESENTADA A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR

Leandro Adrián Díaz Rodríguez

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS
PARA LA FINALIZACIÓN DE LA CARRERA DE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.

DIRECCIÓN DE TESIS

Dr. Ing. Juan Pablo Oliver Universidad de la República

TRIBUNAL

Dra. Ing. Mariana Siniscalchi Universidad de la República

Dr. Ing. Jorge Visca Universidad de la República

Dr. Ing. Nicolás Pérez Universidad de la República

DIRECCIÓN ACADÉMICA

Dr. Ing. Juan Pablo Oliver Universidad de la República

Montevideo
martes 10 marzo, 2026

BleTree: Protocolo para Extender la Cobertura de BLE en Redes de Sensores con Aplicación al Monitoreo de Calidad del Aire, Leandro Adrián Díaz Rodríguez.

ISSN 1688-2806

Esta tesis fue preparada en L^AT_EX usando la clase iietesis (v1.2).

Contiene un total de 76 páginas.

Compilada el martes 10 marzo, 2026.

<http://iie.fing.edu.uy/>

Resumen

Esta tesis comienza con la implementación de redes Bluetooth Low Energy (BLE) y BLE Mesh para el desarrollo de un sistema para el monitoreo de la calidad del aire en ambientes interiores mediante la medición de concentraciones de CO₂, temperatura y humedad. Esta aplicación se llevó a cabo en el marco de un proyecto interdisciplinario enfocado en el estudio de dichas variables en centros educativos. Para ello, se desplegaron tres redes IoT capaces de realizar mediciones de estas variables: una red destinada a evaluar el nivel de CO₂ en distintos puntos de un salón, y dos redes, una en cada escuela, para medir el CO₂ en todos los salones. El sistema implementado emplea dos protocolos de comunicación distintos según el tipo de aplicación. Para el análisis del CO₂ en diferentes puntos de un mismo salón se utilizó el protocolo BLE, debido a su simplicidad y alcance suficiente. En cambio, para la medición en todos los salones de dos escuelas se empleó BLE Mesh, dado su mayor alcance y capacidad de cubrir áreas extensas.

El hardware se basó en el microcontrolador nRF52840, alimentado por tres pilas AA, e integró sensores de bajo consumo para las variables mencionadas. Se fabricaron 65 dispositivos con un costo unitario aproximado de 57 dólares. El firmware fue desarrollado utilizando nRF Connect SDK y Zephyr. Los datos recolectados se almacenan en una Raspberry Pi, que actúa como nodo base y servidor web, utilizando el framework Flask, permitiendo la visualización en tiempo real de las condiciones ambientales. Se instalaron *tablets* conectadas al servidor web para visualizar los niveles de CO₂ y permitir la toma de decisiones sobre ventilación en tiempo real.

Durante la implementación de estas redes se identificaron diversas limitaciones, lo que motivó la exploración y el desarrollo de un protocolo de bajo consumo denominado BLETree. Este protocolo, basado en la tecnología BLE, está orientado a extender su cobertura para aplicaciones IoT manteniendo un bajo consumo energético y una estructura escalable. Este protocolo surge como respuesta a las limitaciones observadas en implementaciones previas de redes IoT basadas en BLE y BLE Mesh, donde la primera presenta un alcance restringido debido a su topología en estrella, mientras que la segunda implica un consumo elevado al requerir nodos repetidores con sus radios permanentemente activas. La propuesta combina las ventajas de ambas tecnologías mediante una arquitectura en árbol que permite operar todos los nodos con alimentación a baterías, facilitando su uso en entornos con disponibilidad energética limitada.

El protocolo fue desarrollado también sobre nRF Connect SDK y Zephyr, em-

pleando una estructura modular organizada en capas funcionales de conexión, descubrimiento, enrutamiento y transporte. La formación del árbol se basa en los conceptos de multirrol y multilink, permitiendo que cada nodo actúe simultáneamente como central y periférico. Esta característica posibilita la creación dinámica de una red jerárquica en la que los nodos se conectan según criterios de distancia, números de saltos, calidad de enlace (RSSI) y número de conexiones activas. El proceso de establecimiento y mantenimiento de la topología fue diseñado para minimizar el tiempo de radio activa, reduciendo significativamente el consumo energético.

Comparando las tres implementaciones, BLE, BLE Mesh y BLETree, los resultados experimentales muestran que BLETree alcanza una cobertura significativamente mayor que BLE, manteniendo un consumo energético del mismo orden de magnitud. El consumo promedio medido fue de aproximadamente 84 μA en los nodos intermedios, 11 μA en los nodos hoja y 54 μA en el nodo raíz, valores muy inferiores a los observados en BLE Mesh, donde los nodos repetidores superan los 5 mA. Si bien la topología en árbol introduce una mayor latencia, esta se mantiene dentro de niveles adecuados para aplicaciones de monitoreo ambiental con baja frecuencia de muestreo. Los resultados obtenidos confirman que BLETree puede operar de forma estable y autosuficiente, validando su potencial como solución de comunicación IoT eficiente en energía y de cobertura extendida.

Finalmente, de manera independiente a las tres implementaciones mencionadas, se recopiló una base de datos con mediciones continuas de CO_2 , temperatura y humedad durante más de dos años. Esta base ha sido utilizada por el equipo de Mecánica de los Fluidos para realizar diversos análisis y publicaciones científicas. Dichos antecedentes constituyeron la base y motivación para el desarrollo del protocolo BLETree, consolidando una línea de investigación centrada en redes IoT de bajo consumo y monitoreo ambiental.

Tabla de contenidos

Resumen	I
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Tareas y aportes realizados	3
1.3. Estado del arte	5
1.4. Descripción del documento	6
2. Protocolos BLE y BLE Mesh	7
2.1. Protocolo BLE	7
2.2. Protocolo BLE Mesh	10
3. Redes BLE y BLE Mesh para el monitoreo de Calidad del Aire	13
3.1. Calidad del aire	13
3.2. Arquitectura de los sistemas	14
3.3. Hardware desarrollado	15
3.3.1. Microcontrolador	16
3.3.2. Sensores	16
3.3.3. Esquemático y PCB	16
3.3.4. Fabricación de los dispositivos	18
3.4. Firmware	19
3.4.1. Aplicación	20
3.5. Base de datos y visualización	22
3.5.1. Base de datos	22
3.5.2. Visualización de datos	24
3.6. Sistema BLE	26
3.7. Sistema BLE Mesh	27
4. Diseño del Protocolo BleTree	31
4.1. Conceptos Multirol y Multilink	31
4.2. Topología árbol	33
4.3. Diseño General de la Solución	33
4.4. Formación del árbol	34
4.4.1. Conexión con Padre	36
4.4.2. Conexión con Nodos Hijos	37

Tabla de contenidos

4.5. Mantenimiento y Actualización	40
4.6. Servicios y características	40
4.7. Algoritmo para el intercambio de mensajes dentro del árbol	41
4.8. Firmware desarrollado para el protocolo	41
5. Resultados Experimentales	43
5.1. Cobertura	43
5.2. Caracterización del consumo BLETree	44
5.3. Consumo energético	47
5.3.1. BLE	47
5.3.2. BLE Mesh	48
5.3.3. BLETree	48
5.4. Latencia y Escalabilidad	48
5.5. Comparación de protocolos BLE, BLE Mesh y BLETree	50
5.6. Resultados de las redes instaladas en las escuelas	50
6. Conclusiones	53
6.1. Publicaciones asociadas a la tesis	54
6.2. Trabajo a futuro	55
6.2.1. Consideraciones sobre la latencia en BLETree y propuesta de mejora	55
6.2.2. Extensión de BLETree hacia una topología Mesh	56
Apéndices	57
A. Desarrollo de las diferentes versiones de hardware	57
Referencias	61
Índice de tablas	65
Índice de figuras	66

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

El crecimiento exponencial del Internet de las Cosas (IoT) durante la última década ha impulsado la necesidad de soluciones inalámbricas que logren equilibrar tres características fundamentales: bajo consumo energético, escalabilidad y fiabilidad en la comunicación. Esta demanda surge como consecuencia de la expansión de los dispositivos inteligentes en entornos industriales, residenciales y urbanos, donde la autonomía energética y la cobertura de la red son factores clave para el éxito de las implementaciones [1].

En la actualidad, existen diversas tecnologías empleadas en el ámbito del IoT, entre las más destacadas se encuentran BLE (Bluetooth Low Energy), BLE Mesh, Zigbee, 6LoWPAN, Thread, Wi-Fi y LoRa. Cada uno de estos protocolos inalámbricos posee su propio conjunto de propiedades y prestaciones, adecuadas para diferentes escenarios de aplicación, que los hacen más o menos adecuados según el entorno de uso. La Tabla 1.1 resume algunas de las características principales para estos protocolos [2–5].

Tabla 1.1: Comparación de protocolos inalámbricos IoT.

Característica	BLE	BLE Mesh	6LoWPAN	LoRa	Wi-Fi	Zigbee
IEEE standard	802.15.1	802.15.1	802.15.4	Propietario (LoRaWAN)	802.11 b/g/n	802.15.4
Frecuencia	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz / Sub-GHz	433/868/915 MHz	2.4 / 5 GHz	2.4 GHz
Rango típico máx (1 hop)	10–100 m	10–100m	10–100 m	1–15 km	20–100 m	10–100 m
Velocidad máx.	2 Mbps	2 Mbps	250 kbps	0.3–50 kbps	11–600 Mbps	250 kbps
Consumo promedio	10–50 μ A	50–200 (LPN) μ A	50–200 μ A	10–50 μ A	50–200 mA	50–200 μ A

Los valores representados en la Tabla 1.1 representan órdenes de magnitud y no valores absolutos, ya que dependen significativamente del hardware y firmware donde se implementa el protocolo. Por ejemplo, en BLE para un SoC nRF51822, que integra un procesador ARM Cortex-M0 a 16 MHz y radio BLE, presenta un pico de consumo en transmisión a 0 dBm de aproximadamente 10,5 mA, mientras que mantener la radio encendida para la recepción requiere alrededor de 13 mA. En este dispositivo, el consumo promedio en una conexión BLE de 1 segundo enviando 20 bytes, es del orden de 15–20 μ A [6]. En cambio, el SoC nRF52840,

Capítulo 1. Introducción

con procesador ARM Cortex-M4F a 64 MHz, logra picos de transmisión menores, con un consumo pico de transmisión a 0 dBm de alrededor de 5,3 mA, y 4,6 mA de consumo para mantener la radio encendida para recepción. En este caso, el consumo promedio en una conexión BLE para las mismas condiciones se sitúa en torno a 5–10 μ A, lo que representa un consumo mucho menor con respecto a la tecnología anterior [7]. De forma análoga, el alcance máximo puede variar según el escenario de uso, en particular, suele diferir entre entornos interiores y exteriores.

Ninguna tecnología resulta óptima en todos los aspectos, cada una ofrece ventajas en ciertas características y presenta limitaciones en otras. Por ese motivo, no es posible afirmar de forma general que una tecnología sea superior a otra. Por ejemplo, BLE se destaca por su bajo consumo energético y su integración en dispositivos móviles, aunque su alcance es limitado y no resulta adecuado para redes extensas. En contraste, LoRa permite comunicaciones de muy largo alcance con un consumo energético reducido, pero su baja tasa de transferencia y alta latencia restringen su uso a aplicaciones donde el envío de pequeños volúmenes de datos es suficiente. Por su parte, Wi-Fi proporciona altas velocidades de transmisión y una infraestructura ampliamente disponible, aunque su consumo energético elevado lo hace menos adecuado para dispositivos alimentados por baterías. Estas diferencias evidencian que la elección de la tecnología depende fuertemente de los requisitos específicos de cada aplicación.

Si comparamos BLE con protocolos basados en IEEE 802.15.4, diversos estudios han destacado que BLE ofrece un consumo energético significativamente menor [8, 9]. Esta ventaja energética ha motivado la búsqueda de mecanismos que permitan extender su cobertura manteniendo sus beneficios en consumo. BLE fue introducido como parte de la especificación Bluetooth 4.0 en 2010 con el objetivo de permitir comunicaciones inalámbricas de corto alcance con consumos energéticos mínimos, y su evolución ha consolidado su posición en diversas aplicaciones. A pesar de sus beneficios, BLE presenta limitaciones importantes para su uso en redes extensas. En particular, su arquitectura basada en una topología en estrella restringe la cobertura de la red, su rango alcanza aproximadamente algunas decenas de metros en espacios cerrados [10–12]. Por ejemplo, en aplicaciones de espacios cerrados con una potencia de transmisión de +0 dBm, la comunicación BLE puede alcanzar hasta los 20 metros [13]. Como solución a esto, BLE Mesh surgió como una alternativa para superar este obstáculo, mediante el uso de nodos repetidores y *flooding* controlado. Este concepto se basa en que los nodos retransmiten los mensajes recibidos a todos sus vecinos para asegurar que el mensaje llegue a su destino sin un mecanismo de ruteo. Sin embargo, la especificación Bluetooth Mesh obliga a determinados nodos tener la radio encendida, nodos repetidores, lo que incrementa el consumo energético y limita su aplicabilidad en dispositivos con recursos restringidos. Por esta razón, resulta necesario explorar alternativas que permitan extender la cobertura de BLE sin sacrificar sus ventajas energéticas.

Esta tesis surge dentro de un proyecto interdisciplinario que reúne a médicos, biólogos, arquitectos e ingenieros con el propósito de estudiar la calidad del aire en centros educativos. En particular, el grupo de Mecánica de los Fluidos se enfoca en analizar las variables de dióxido de carbono (CO_2), temperatura y

1.2. Tareas y aportes realizados

humedad en salones escolares. Para llevar a cabo dichos estudios, fue necesario diseñar y desarrollar dispositivos de bajo costo y bajo consumo energético que permitieran realizar mediciones confiables en diversas condiciones de uso. Estos dispositivos se implementaron empleando distintas tecnologías IoT, como BLE y BLE Mesh, adaptadas a diferentes casos de uso. BLE demostró ser una solución adecuada para mediciones en espacios cerrados de dimensiones reducidas, debido a su bajo consumo energético y simplicidad de implementación. Sin embargo, resultó insuficiente en escenarios donde era necesario cubrir áreas más amplias, ya que su alcance restringía la comunicación entre nodos distantes. Para superar esta limitación se utilizó el protocolo BLE Mesh que permite extender la cobertura mediante retransmisión de mensajes entre nodos. No obstante, este protocolo requiere que determinados dispositivos permanezcan conectados de forma continua a la red eléctrica, debido al alto consumo energético. Esta característica imposibilita su funcionamiento autónomo con baterías y genera una dependencia directa con la alimentación eléctrica. En instalaciones donde no se disponía de suministro eléctrico cercano fue necesario implementar una doble red IoT BLE Mesh, interconectada mediante enlaces Wi-Fi. Ante estas dificultades, surgió la motivación de desarrollar una solución que mantuviera las ventajas energéticas de BLE, pero con una cobertura extendida como la de BLE Mesh. En este contexto, se propuso la implementación y evaluación de una red multihop con topología en árbol, BLETree, basada en el protocolo BLE y en los conceptos de multirrol y multilink que busca mitigar los problemas surgidos con las redes BLE y BLE Mesh. La arquitectura de BLETree planteada emplea nodos capaces de actuar simultáneamente como central y periférico, lo que permite conformar una estructura jerárquica en árbol. Este enfoque busca combinar la cobertura extendida de las topologías multihop con la eficiencia energética característica de BLE, ofreciendo así una alternativa que preserve sus ventajas, amplíe su alcance y opere exclusivamente con baterías, logrando una autonomía considerable. Es pertinente cuestionar por qué desarrollar un protocolo en lugar de adoptar otros ya establecidos. Si bien la mayoría de las plataformas de hardware actuales incluyen soporte de radio para operar en distintas bandas de frecuencia, en las primeras etapas del trabajo se utilizó un microcontrolador nRF51822, cuyo transceptor únicamente admite protocolos como BLE y BLE Mesh, por lo cual no era posible utilizar otros protocolos. Además, la creación y comparación de este nuevo protocolo con alternativas consolidadas representa un ejercicio valioso para evaluar su desempeño y potencial en aplicaciones reales.

1.2. Tareas y aportes realizados

La presente tesis aborda el diseño, implementación, instalación y evaluación de redes orientadas al monitoreo de la calidad del aire en centros educativos. Se presentan los diferentes sistemas desarrollados con tecnologías BLE y BLE Mesh, seleccionadas según el alcance y los requerimientos de cada instalación. El trabajo describe el proceso completo, desde el desarrollo del hardware y firmware hasta la instalación y el software de aplicación. Posteriormente, se analizan las

Capítulo 1. Introducción

limitaciones observadas en estos protocolos, principalmente relacionadas con el consumo energético y la cobertura. Finalmente, se propone y evalúa el protocolo BLETree, una alternativa desarrollada con topología en árbol que combina la eficiencia energética de BLE con una mayor extensión de cobertura, comparando su desempeño con las soluciones previamente implementadas.

En resumen, el trabajo desarrollado en esta tesis incluye:

- Estudio de los dispositivos y sensores disponibles en el mercado.
- Diseño, desarrollo y fabricación de los equipos de medición.
- Desarrollo del firmware basado en Zephyr.
- Instalación y puesta en marcha en dos escuelas de Montevideo.
- Implementación de una base de datos para el almacenamiento de mediciones.
- Acceso remoto a los datos desde la red de la Facultad de Ingeniería, Udelar.
- Desarrollo de una aplicación web para la visualización en tiempo real.
- Análisis comparativo de redes BLE y BLE Mesh.
- Diseño e implementación del protocolo BLETree como alternativa energética y optimizada para extender el alcance.

El trabajo no incluye:

- Análisis de los datos medidos
- Despliegue final de BLETree en una instalación escolar.

La presente tesis generó aportes tanto en el ámbito de las tecnologías IoT basadas en BLE como en áreas complementarias. A modo de resumen, a continuación se enumeran los principales aportes realizados:

- Desarrollo de un sistema IoT funcional empleado en campañas de medición reales.
- Generación de una base de datos extensa de niveles de CO₂ recopilados durante varios años.
- Implementación de BLETree, un protocolo que extiende la cobertura de BLE manteniendo su bajo consumo.
- Caracterización comparativa del consumo energético de BLE, BLE Mesh y BLETree.
- Varias publicaciones académicas asociadas a los resultados de esta tesis (ver Capítulo 6).

1.3. Estado del arte

Sobre la misma capa física de BLE, y más allá del protocolo BLE Mesh, se han planteado diversas propuestas orientadas a extender su cobertura a través de estructuras jerárquicas. Una de las alternativas más destacadas es la implementación de topologías en árbol, que organizan la red de forma jerárquica para minimizar la actividad innecesaria de la radio y equilibrar la carga entre los nodos. Por ejemplo, en [14] se presenta una red en árbol sobre BLE, en la que los nodos padres permanecen con la radio encendida para detectar nuevos hijos. Si bien esta estrategia permite construir la topología, la escucha activa para la detección de nuevos nodos genera un consumo energético elevado en los nodos padres, lo cual reduce la autonomía de la red y hace difícil mantener todos los nodos con baterías.

En paralelo, se han investigado alternativas como FruityMesh [15], un firmware de malla que se basa en el protocolo BLE orientado a aplicaciones industriales. FruityMesh utiliza un algoritmo de formación de malla distribuido sobre BLE clásico, permitiendo conexiones multihop y balanceo de carga entre los nodos. No obstante, el consumo energético en FruityMesh sigue siendo considerable cuando la red requiere actualizaciones periódicas, dado que los nodos deben mantener sus radios activas para detectar cambios y reconfigurar la topología.

Otra aproximación interesante es la descrita en [16], donde los autores implementan una red en árbol mediante dos dispositivos BLE por nodo, uno actuando como central y otro como periférico, físicamente interconectados. Esta configuración permite mantener roles separados y simplifica la lógica de conexión. Sin embargo, la duplicación del hardware por nodo incrementa el costo, el tamaño y el consumo general del sistema, lo cual limita su escalabilidad y viabilidad en aplicaciones de gran escala.

En general, en estas implementaciones no se presenta un mecanismo claramente definido para el establecimiento y mantenimiento de la topología en árbol, ni se dispone de un análisis detallado del consumo energético en condiciones reales de operación. Tampoco se incluyen evaluaciones comparativas que permitan determinar el impacto de estas arquitecturas frente a otras alternativas disponibles. Parte del aporte de esta tesis busca cubrir estas carencias mediante el diseño e implementación de una solución *open source*, documentada de forma completa, que no solo detalla el consumo energético en distintos escenarios de uso, sino que también incorpora mediciones y comparaciones con otras aproximaciones.

En [17] se presenta una arquitectura de red BLE basada en una topología jerárquica en forma de árbol, en la cual los nodos intermedios operan simultáneamente en roles de central y peripheral, permitiendo la comunicación multinivel dentro de la red. El trabajo demuestra la viabilidad técnica de implementar este esquema utilizando capacidades estándar de BLE y describe un mecanismo básico de formación de la topología. No obstante, la propuesta se centra principalmente en aspectos arquitectónicos y de implementación, sin profundizar en un análisis detallado del consumo energético.

1.4. Descripción del documento

El documento se organiza de la siguiente manera: el Capítulo 2 introduce las tecnologías empleadas para la medición de la calidad del aire, BLE y BLE Mesh. Se presenta de forma breve los conceptos principales de cada una.

El Capítulo 3 describe el contexto experimental que dio lugar a esta investigación, desarrollado en colaboración con el grupo de Mecánica de los Fluidos. Se analiza la importancia del estudio de la calidad del aire en espacios educativos y la necesidad de contar con herramientas de monitoreo confiables para evaluar las condiciones de ventilación. En este capítulo se detallan los sistemas implementados para la medición de la calidad del aire considerando las variables de dióxido de carbono, temperatura y humedad. Se incluyen las diferentes versiones de hardware desarrolladas, la descripción del firmware implementado en Zephyr y el software desarrollado para el despliegue de herramientas visuales que permiten la visualización en tiempo real de los datos. Asimismo, se detallan las redes BLE y BLE Mesh desplegadas en escuelas, explicando sus configuraciones, objetivos y los resultados obtenidos. Finalmente, se discuten las principales limitaciones encontradas, en particular las asociadas al alcance de BLE y al alto consumo energético de BLE Mesh, las cuales motivaron la creación de una nueva solución.

El Capítulo 4 constituye un aporte principal de esta tesis y presenta el diseño e implementación del protocolo BLETree. Se explica su concepción como una red multihop con topología en árbol basada en BLE, que aprovecha las capacidades de multirole y multilink para extender la cobertura manteniendo un consumo energético reducido. El capítulo aborda en detalle el proceso de formación dinámica del árbol, los criterios de selección de padres e hijos, los mecanismos de actualización y mantenimiento, y los servicios y características definidos para el intercambio de información.

El Capítulo 5 presenta la caracterización del consumo de los protocolos BLE, BLE Mesh y BLETree. Se realiza una comparación entre los tres protocolos y se discuten los beneficios y desventajas de cada uno. Los resultados obtenidos permiten cuantificar los beneficios en términos de autonomía, cobertura y eficiencia energética, validando la viabilidad del protocolo propuesto. Por último, se presentan los resultados obtenidos en la aplicación de monitoreo de calidad del aire implementada en las escuelas.

Finalmente, en el Capítulo 6 se exponen las conclusiones generales del trabajo, los principales aportes de la tesis y las líneas de investigación futura.

Capítulo 2

Protocolos BLE y BLE Mesh

Este capítulo describe los protocolos empleados en las implementaciones desarrolladas para el monitoreo de la calidad del aire. En estas implementaciones se utilizó BLE y BLE Mesh, lo que permitió evaluar en la práctica sus ventajas y limitaciones, sirviendo como base para definir los objetivos y criterios de diseño del protocolo BLETree.

Primero se presentan los conceptos fundamentales de ambos protocolos, junto con sus características técnicas más relevantes. La aplicación y el contexto de uso de cada uno se desarrollan en el Capítulo 3. De manera introductoria, BLE fue utilizado para el diseño de un sistema orientado al análisis de la calidad del aire en un único espacio, limitado por su alcance, mientras que BLE Mesh se empleó para cubrir áreas más extensas donde el protocolo BLE resultaba insuficiente por su alcance.

2.1. Protocolo BLE

El protocolo BLE se caracteriza por un buen rendimiento para la comunicación de corto alcance en muchas aplicaciones como la salud, la electrónica de consumo, la energía y la seguridad. Su banda va desde los 2,402 GHz hasta los 2,480 GHz y está dividido en 40 canales, Figura 2.1. Los canales 37, 38 y 39 están reservados para *advertising* mientras que los otros canales están reservados para cambiar datos entre dispositivos conectados.

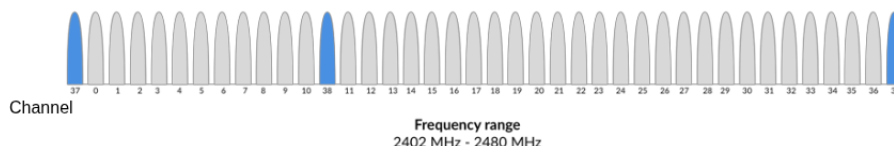


Figura 2.1: Canales usados en BLE. Imagen extraída de [18].

BLE fue diseñado originalmente para crear redes en estrella. Sin embargo como se mencionó en el Capítulo 1, esta topología limita la cobertura de una red BLE

Capítulo 2. Protocolos BLE y BLE Mesh

debido a que sus enlaces están en el orden de unas pocas decenas de metros en entornos de interior. Por estas características no puede ser utilizado para abarcar grandes áreas.

BLE soporta dos tipos de comunicación: *broadcast communication* (*connectionless*) y *connection-oriented communication* como se muestra en la figura 2.2.

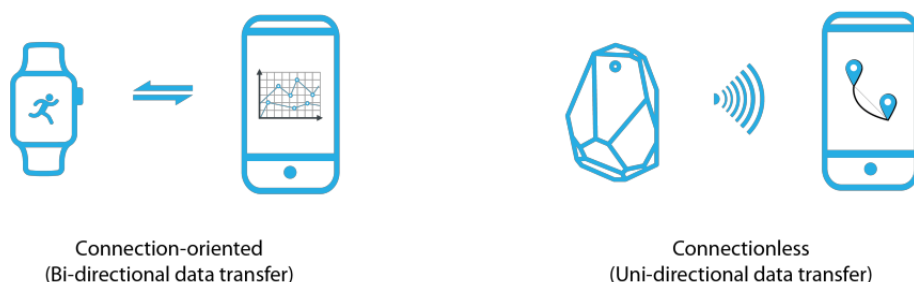


Figura 2.2: Proceso de conexión de dos dispositivos BLE. Imagen extraída de [18].

La elección entre uno u otro depende de los requerimientos de la aplicación, ya que cada enfoque ofrece ventajas distintas. Por un lado, la *broadcast communication* resulta adecuada en escenarios donde existen múltiples nodos alimentados a batería que transmiten datos hacia un dispositivo central con muy baja frecuencia y no necesita una comunicación bidireccional. En este esquema, los nodos envían los mensajes de manera asíncrona, sin necesidad de establecer un proceso de conexión, lo que reduce significativamente su consumo energético de los transmisores. En cambio, el consumo del receptor incrementa debido a que tiene que estar siempre con la radio encendida. Este enfoque es viable cuando el dispositivo que recibe los datos dispone de una fuente de energía confiable, por ejemplo al estar conectado a la red eléctrica, o al tratarse de un celular o computadora con alta capacidad de batería, ya que debe mantener su radio en estado de escucha de forma continua para recibir los mensajes.

Por otro lado, cuando el dispositivo central también está alimentado a batería y resulta necesario minimizar su consumo energético, la opción más conveniente es la comunicación *connection-oriented*, también cuando se necesita una comunicación bidireccional. En este caso, se establece un proceso de sincronización en el cual el periférico y el central acuerdan parámetros como el intervalo de conexión. De esta manera, ambas radios permanecen apagadas la mayor parte del tiempo y solo se activan en los momentos pactados para transmitir o recibir datos. Si bien este esquema implica un mayor consumo en los nodos que envían datos debido al establecimiento y mantenimiento de la conexión, permite que el dispositivo central ahorre energía de forma significativa. Además, en este modo, cada paquete transmitido es confirmado por el receptor, lo que minimiza la pérdida de información y garantiza mayor robustez en el enlace.

Parte de las redes implementadas en este trabajo utilizan BLE en modo *connection-oriented*; por lo tanto, a continuación se presentan los conceptos principales asociados a este tipo de comunicación.

2.1. Protocolo BLE

Los dos roles en un tipo de comunicación *connection oriented* son:

- Central: dispositivo que busca paquetes *advertising* y responde a ellos para iniciar una conexión. Es responsable de iniciar los intercambios periódicos de datos.
- Periférico: envía los paquetes *advertising* para anunciar su presencia y expresar la intención de establecer una conexión.

El proceso de conexión entre dos dispositivos BLE, se ilustra en la Figura 2.3.

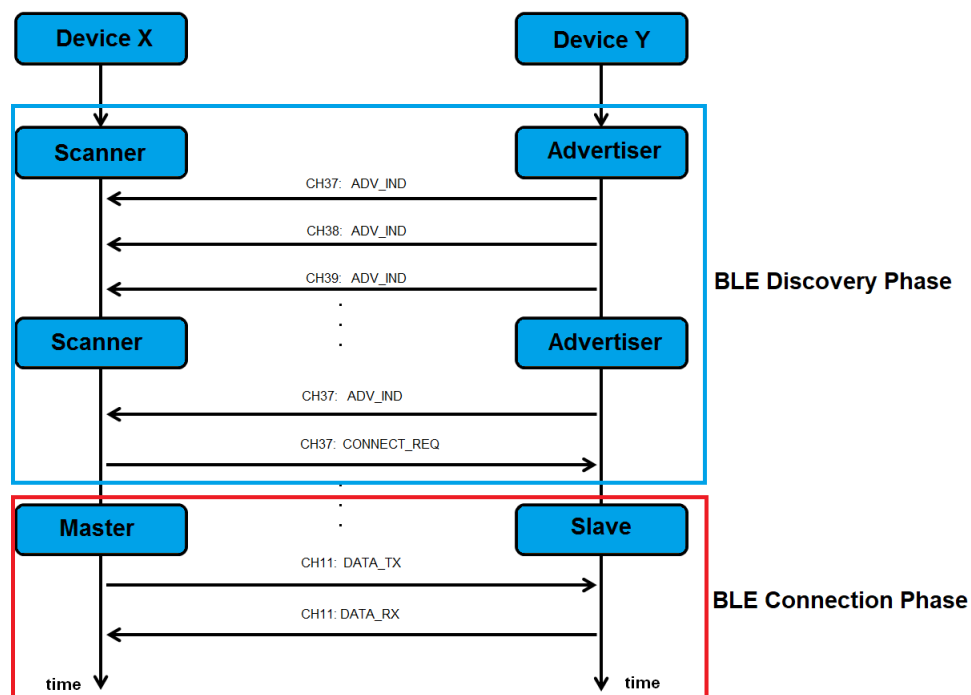


Figura 2.3: Proceso de conexión de dos dispositivos BLE. Imagen extraída de [18].

Este proceso inicia de la siguiente manera, el periférico emite periódicamente paquetes *advertising* a través de los canales 37, 38 y 39, con el objetivo de anunciar su presencia y ofrecer la posibilidad de establecer una conexión. Dichos paquetes pueden incluir datos como el nombre del dispositivo, los servicios soportados o información del fabricante. El dispositivo central, que mantiene su radio encendida en modo de escaneo, escucha en estos mismos canales y recibe los paquetes de *advertising*. A partir de la información contenida en ellos, el central decide si iniciar o no una conexión con el periférico.

En caso afirmativo, el central envía una petición de conexión, ya que es siempre este rol quien inicia el procedimiento. A partir de allí, ambos dispositivos intercambian mensajes para acordar parámetros fundamentales de la comunicación, como el intervalo de conexión (tiempo entre intercambios de datos), la latencia del periférico (cantidad de intervalos que puede omitir para ahorrar energía) y el

Capítulo 2. Protocolos BLE y BLE Mesh

supervision timeout (tiempo máximo que puede transcurrir sin recibir paquetes antes de que se dé por perdida la conexión).

Una vez establecida la conexión, los datos se transmiten en intervalos regulares definidos por el periodo de conexión, utilizando los 37 canales de datos restantes de BLE. La técnica de *frequency hopping*, que implica cambiar de canal en cada transmisión siguiendo una secuencia acordada, permite reducir las interferencias y mejorar la robustez del enlace. Debido a la negociación de parámetros, los nodos pueden sincronizarse y pueden apagar su radio entre intervalos, lo que contribuye a un uso eficiente de la energía. El dispositivo central puede decidir si mantener su radio encendida para conectarse con otros dispositivos o solo tener esa conexión. La conexión se considera perdida si el central no recibe mensajes del periférico durante el tiempo definido por el *supervision timeout*.

2.2. Protocolo BLE Mesh

Para poder tener una red con una cobertura más extensa se utilizó el protocolo BLE Mesh. Aunque BLE y BLE Mesh pertenecen a la misma tecnología, solo comparten la capa física y la capa de enlace, mientras que las demás capas difieren, lo que impide que se comuniquen directamente entre sí.

Al adoptar una topología Mesh, no es necesario que los nodos se encuentren dentro del mismo rango de cobertura, ya que los mensajes pueden reenviarse de nodo en nodo hasta alcanzar su destino. Esto permite extender significativamente el alcance de la red y convierte a BLE Mesh en una solución adecuada para aplicaciones de IoT que requieren mayor cobertura. El protocolo utiliza un mecanismo de inundación, *flooding-based* para el envío de mensajes, empleando los canales 37, 38 y 39, que en BLE están destinados al envío de *advertising*. En este sentido, puede decirse que BLE Mesh se basa en el modo de comunicación broadcast, dado que los mensajes son transmitidos de manera asíncrona y pueden ser recibidos por múltiples nodos. No obstante, BLE Mesh introduce mecanismos adicionales que lo diferencian de un broadcast simple como el concepto de *Time To Live* (TTL) que limita la cantidad de saltos permitidos, evitando así retransmisiones infinitas. Además, los nodos almacenan temporalmente los mensajes en caché para detectar duplicados y no reenviarlos nuevamente, lo que reduce el tráfico innecesario en la red. Estas técnicas, junto con el uso de retransmisiones configurables y el cifrado de extremo a extremo, permiten que BLE Mesh construya una comunicación fiable, segura y escalable sobre la base de la difusión.

BLE Mesh ofrece varios tipos de nodos que permiten a cada uno desempeñar diferentes funciones en la red. En la Figura 2.4 se observa un ejemplo de la red BLE Mesh donde se pueden identificar nodos con diferentes roles.

A continuación, se presentan los diferentes tipos de nodos. Cabe destacar que un dispositivo que no cumple ninguna de las funciones que se mencionan se denomina simplemente nodo. Estos nodos participan en la red intercambiando mensajes, pero sin desempeñar roles adicionales. Además un nodo puede tener múltiples características.

2.2. Protocolo BLE Mesh

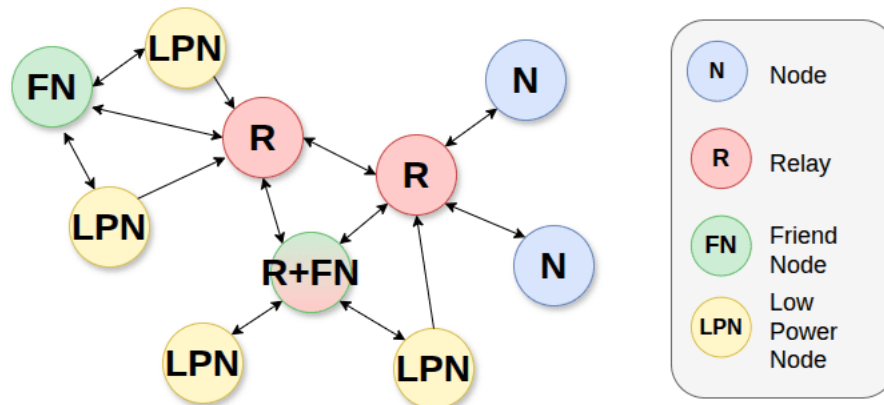


Figura 2.4: Diferentes tipos de nodo dentro de una red BLE Mesh.

- *Relay*: son encargados de retransmitir los mensajes. Cuando un nodo origen y otro destino no están en alcance directo, los mensajes deben ser retransmitidos por otros nodos de la red. Esta es una de las características más importantes, ya que hace posible que la comunicación alcance mayores distancias.
- *Low power node* (LPN): la red en malla requiere una conexión constante a la red eléctrica debido a que los nodos deben estar con la radio encendida en todo momento. Sin embargo, un nodo LPN puede funcionar en modo bajo consumo, donde está la mayoría del tiempo con la radio apagada, lo que reduce el consumo de energía, y solo se habilita cuando es necesario. Para esto necesita la ayuda de un *friend node* (FN), nodo que no tiene restricciones de energía.
- *Friend node* (FN): un nodo FN se encarga de almacenar y reenviar los mensajes destinados a los nodos LPN asociados. Para ello, el nodo LPN inicia un procedimiento denominado *Friendship*, mediante el envío de solicitudes de establecimiento hacia nodos potenciales FN. Una vez aceptada la solicitud, el FN asume la responsabilidad de almacenar temporalmente los mensajes dirigidos al LPN, mientras que este último puede entrar en estado de bajo consumo. El nodo LPN despierta periódicamente y envía solicitudes de actualización (*poll*) al FN para recuperar los mensajes pendientes.
- *Proxy*: este nodo permite que la red BLE Mesh se comunice con nodos que utilizan el protocolo BLE. Para que esto sea posible el dispositivo es capaz de manejar los dos protocolos.

Debido a sus características, como el largo alcance y el bajo consumo de los nodos LPN este protocolo es útil cuando se quieren abarcar grandes áreas. Pero es importante destacar que, dado que la comunicación en BLE Mesh es de carácter asíncrono, los mensajes pueden transmitirse en cualquier momento. Por esta razón,

Capítulo 2. Protocolos BLE y BLE Mesh

los nodos Relay y FN deben mantener su radio encendida de forma continua para poder recibir y reenviar dichos mensajes. Esta condición implica que ambos tipos de nodos requieran una conexión permanente a la red eléctrica, ya que una alimentación mediante baterías no constituye una opción viable en la práctica debido al alto consumo energético asociado.

Capítulo 3

Redes BLE y BLE Mesh para el monitoreo de Calidad del Aire

Este capítulo describe el desarrollo de los dispositivos IoT y las redes empleadas para el despliegue del sistema de monitoreo de la calidad del aire en los ambientes escolares.

El capítulo comienza describiendo la motivación y la relevancia del estudio de la calidad del aire interior, destacando el dióxido de carbono como principal indicador de ventilación, además de la temperatura y humedad. Posteriormente, se presentan los sistemas diseñados y fabricados para medir las variables ambientales, incluyendo las distintas versiones de hardware y firmware diseñadas. Se describe la infraestructura de software utilizada para la adquisición, almacenamiento y visualización de los datos. Finalmente se detallan las diferentes redes implementadas, una red basada en BLE y otra utilizando BLE Mesh. La red BLE es utilizada para estudios en espacios reducidos en cambio la red BLE Mesh es destinada a cubrir áreas de mayor extensión.

3.1. Calidad del aire

La calidad del aire interior (IAQ por sus siglas en inglés *Indoor Air Quality*) es fundamental para mejorar el bienestar de las personas en los ambientes interiores. Este término describe la calidad del aire de un edificio; especialmente se refiere a la salud y comodidad de los ocupantes del edificio [19]. Mantener una buena IAQ no solo previene problemas de salud como alergias y dificultades respiratorias, sino que también mejora la concentración, productividad y la satisfacción general en hogares, escuelas, oficinas e instalaciones sanitarias. En las revisiones bibliográficas realizadas hasta el momento, no se ha encontrado un estándar global que defina la calidad del aire interior. Sin embargo, el índice de dióxido de carbono, CO₂, se utiliza como un indicador valioso para evaluar las condiciones de ventilación y la posible presencia de contaminantes más nocivos [20, 21]. Las mediciones de CO₂ son esenciales debido a su impacto significativo en la salud de los ocupantes y el rendimiento en general. Los niveles elevados de CO₂ pueden reducir la cantidad

Capítulo 3. Redes BLE y BLE Mesh para el monitoreo de Calidad del Aire

de oxígeno disponible, lo que genera somnolencia, fatiga y falta de concentración. En niveles extremos, el CO₂ puede provocar dolores de cabeza y mareos [22–24]. Varios estudios demuestran estos efectos.

No existe una normativa específica que establezca los valores permitidos de CO₂. Sin embargo, estudios previos indican que a partir de concentraciones de aproximadamente 2500 ppm (partes por millón) comienzan a manifestarse efectos adversos. En la Tabla 3.1 se observan los efectos según el nivel de CO₂ [25].

Tabla 3.1: Índice de los niveles de CO₂.

Efectos	Niveles de CO ₂
IAQ alta, nivel medio exterior	350 - 450 ppm
IAQ aceptable	450 - 1500 ppm
IAQ baja, somnolencia general	1500 - 2500 ppm
IAQ inaceptable, efectos adversos	2500 - 5000 ppm

Dada la relevancia de la calidad del aire interior, el equipo interdisciplinario se propuso estudiarla en ambientes escolares, con el objetivo general de analizar y diagnosticar situaciones específicas desde distintas perspectivas y proponer estrategias para mejorar las condiciones y mitigar los impactos negativos asociados a una ventilación deficiente. En particular, el grupo de Mecánica de los Fluidos dentro del equipo interdisciplinario se enfoca en el estudio de las variables de CO₂, temperatura y humedad. Para llevar a cabo estos estudios fue necesario desarrollar y desplegar redes IoT capaces de realizar mediciones de estas variables. Estas redes no solo proporcionan la información ambiental requerida, sino que también constituyen el objeto de estudio tecnológico de esta tesis, al permitir evaluar diferentes arquitecturas y protocolos de comunicación inalámbrica orientados al bajo consumo energético.

En este contexto se implementaron dos sistemas complementarios. El primero, denominado sistema de monitoreo general, tiene como propósito medir y registrar los niveles de CO₂, temperatura y humedad en cada salón de una escuela. El segundo, denominado sistema de análisis específico, está diseñado para realizar mediciones de corta duración en múltiples puntos de un mismo ambiente. Este último es portátil y puede trasladarse entre distintas ubicaciones, permitiendo estudiar la distribución espacial del CO₂ sin interferir con el funcionamiento del sistema principal.

3.2. Arquitectura de los sistemas

El sistema desarrollado, tanto para el sistema de monitoreo general como el de análisis específico, tiene como objetivo medir la calidad del aire en ambientes interiores a través de nodos inalámbricos que registran niveles de CO₂, temperatura y humedad. Estos sistemas se implementaron en dos escuelas de Montevideo.

3.3. Hardware desarrollado

La arquitectura IoT se compone de una red de sensores inalámbricos (WSN), cuyo protocolo de comunicación varía según el sistema, junto con la infraestructura necesaria para visualizar y almacenar los datos. El funcionamiento general es el siguiente: cada nodo adquiere los datos y los envía periódicamente a un nodo central. Este nodo central, conectado a una Raspberry Pi, actúa de *gateway* entre la red inalámbrica y la comunicación serial. Los datos recibidos por este nodo son transferidos a la Raspberry Pi a través de una conexión USB. La Raspberry Pi almacena los datos en un archivo CSV organizado cronológicamente. Al conjunto nodo central y Raspberry Pi lo denominamos nodo base. La Raspberry Pi ejecuta un servidor web que permite visualizar de forma gráfica y en tiempo real la evolución de las variables medidas, facilitando el análisis e interpretación de los datos. Además, el sistema contempla el envío de la información a un servidor remoto para respaldo y la posibilidad de acceder mediante SSH para su consulta directa o configuración. En la Figura 3.1 se puede observar el sistema general para la medición de la calidad del aire.

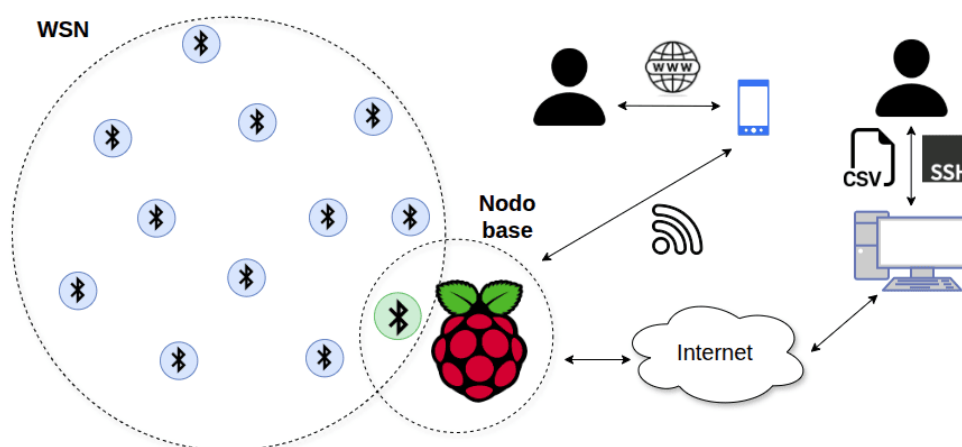


Figura 3.1: Sistema general para la medición de calidad del aire.

Los sistemas se implementaron en distintos escenarios adaptando la tecnología de comunicación al área a cubrir. Para la medición de la calidad del aire en varios puntos dentro de un mismo salón, denominado sistema de análisis específico, se empleó BLE, ya que su alcance resultaba suficiente. En cambio, para la medición de la calidad del aire en múltiples salones de una escuela, denominado sistema de monitoreo general, se utilizó BLE Mesh, permitiendo una cobertura más amplia.

3.3. Hardware desarrollado

Los nodos inalámbricos para medir la calidad del aire constan de un microcontrolador, sensor de CO₂, sensor de temperatura y humedad. A lo largo del trabajo se diseñaron 3 versiones diferentes. La descripción del hardware y firmware se basa

Capítulo 3. Redes BLE y BLE Mesh para el monitoreo de Calidad del Aire

en la tercera y última versión, versión 2.2 y 2.3, las cuales solo difieren en la incorporación de los LEDs y del puerto USB. En el apéndice A se detalla la evolución del hardware.

3.3.1. Microcontrolador

Se utilizó el módulo Minew MS88SF2 [26] debido a su bajo consumo y su capacidad de RAM. Está basado en el SoC nRF52840 de Nordic Semiconductor que posee una CPU ARM Cortex-M4 de 32 bits que funciona a 64 MHz con 1024 kB flash y 256 kB RAM. Soporta los protocolos BLE, BLE Mesh, IEEE 802.15.4 y protocolos propietarios en 2,4 GHz.

3.3.2. Sensores

Para la elección del sensor de CO₂ se llevó a cabo una búsqueda de distintos modelos disponibles en el mercado. En esta etapa se consideraron cuatro sensores diferentes: Amphenol T6613, Sensirion SCD30, Sunrise 006-0-0008 y Mhz19b. Para evaluar su desempeño, se desarrollaron las bibliotecas para su utilización y poder medir su consumo. En la Tabla 3.2 se observan algunas de las características de cada sensor.

Tabla 3.2: Comparación de sensores de CO₂.

Ref.	Sensor	Frecuencia de muestreo	Corriente promedio
[27]	Amphenol T6613	2 - 60 s	46,5 mA @ 4 s
[28]	Sensirion SCD30	2 - 1800 s	10 mA @ 4 s
[29]	Sunrise 006-0-0008	2 - 65534 s	50 μ A @ 4 s
[30]	MHz19b	10 s	12 mA

El sensor más adecuado fue el Sunrise 006-0-0008 debido a su bajo consumo. Utiliza el principio de NDIR [31] para detectar la existencia de CO₂ en el aire. Tiene una precisión de ± 30 ppm $\pm 3\%$ de la medida. El tiempo de respuesta varía según la frecuencia de muestreo. Por ejemplo, con una frecuencia de muestreo de 30 segundos, el tiempo de respuesta es de 2 segundo.

El sensor de temperatura y humedad seleccionado fue el SHT4X [32]. Es capaz de medir temperatura y humedad desde el mismo dispositivo y se destaca por su muy bajo consumo de energía.

3.3.3. Esquemático y PCB

El diseño de los dispositivos requiere de alimentación a baterías para que su ubicación sea independiente de la red eléctrica y ser seguro en un ambiente escolar, por lo que se evaluaron las tensiones de cada dispositivo para seleccionar la batería adecuada. En la Tabla 3.3 se presentan los rangos de tensión de operación de cada componente.

3.3. Hardware desarrollado

Tabla 3.3: Rango de tensión de operación de cada componente.

Componente	Alimentación (V)
Minew MS88SF2	1,7 - 3,6 (2,5 - 5,5)
Sensor de CO ₂ Sunrise	3,05 - 5
Sensor de TH SHT4x	1,8 - 3,6

Para las baterías se utilizaron 3 pilas AA de 1,5 V cada una, 4,5 V en total. Utilizar solo 2 pilas, que darían un total de 3 V, no cumpliría con el requerimiento del sensor de CO₂. Se optó por pilas debido a su facilidad de cambio y su fácil adquisición. El SoC nRF52840 necesita una alimentación entre 1,7 V y 3,5 V, o puede funcionar en un modo *high voltage* donde necesita una alimentación entre 2,5 V y 5,5 V. Para poder alimentarlo con 3 pilas AA se debió elegir la configuración *high voltage*. El sensor de temperatura y humedad es alimentado a 3,3 V a través del regulador de salida del SoC. El sensor de CO₂ se alimenta directamente de las baterías debido a su consumo de corriente. Cuando el sensor realiza la medida, este consume hasta 100 mA, corriente que no puede suministrar la salida del regulador del SoC. Para que el sensor pueda comunicarse con el SoC con niveles lógicos admisibles, se alimenta su interfaz con la salida del SoC de 3,3 V. En la Figura 3.2 se observa la conexión de la alimentación.

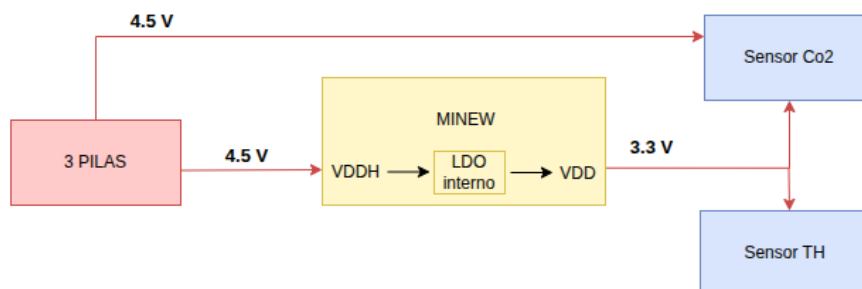


Figura 3.2: Alimentación de los sensores.

Con fines de depuración, el diseño incluye indicadores LED y pines accesibles para la lectura de señales. Asimismo, se dispusieron conectores adicionales que facilitan la integración de futuros sensores u otros módulos de expansión, aumentando la flexibilidad y escalabilidad del sistema. En la Figura 3.3 se observa el esquemático con las conexiones mencionadas.

Capítulo 3. Redes BLE y BLE Mesh para el monitoreo de Calidad del Aire

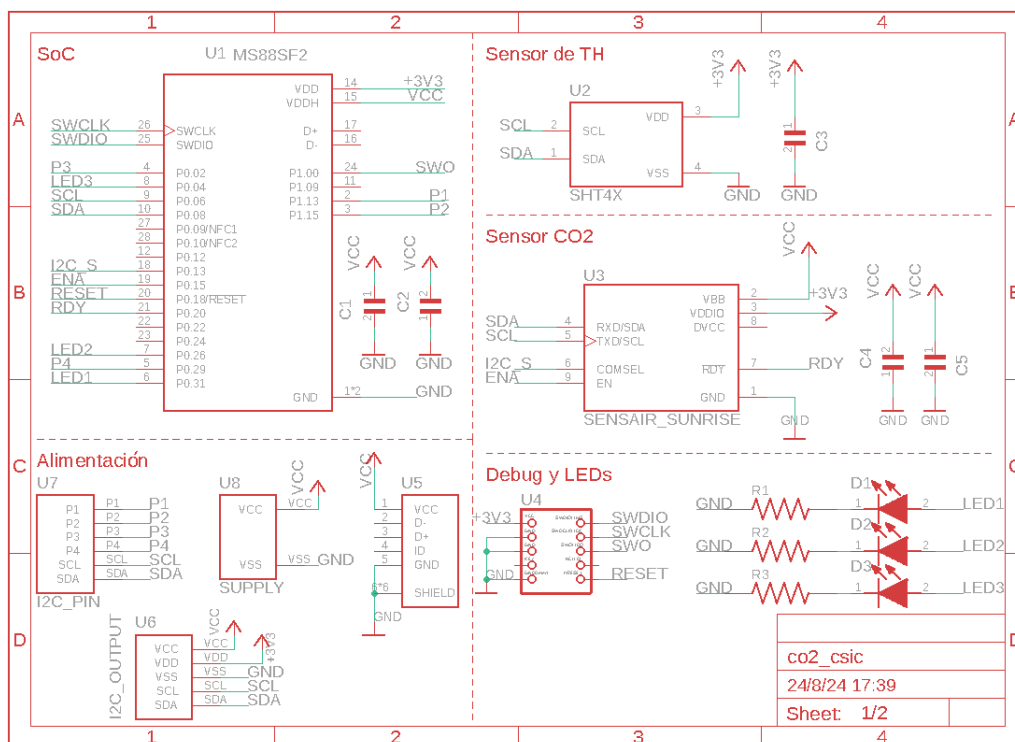


Figura 3.3: Esquemático del hardware utilizado.

3.3.4. Fabricación de los dispositivos

Se fabricaron 65 dispositivos de la última versión. La fabricación del circuito impreso fue realizada en China en la empresa PCBWay con el ensamblaje del sensor de temperatura y humedad, y el módulo Minew. El resto de los componentes se soldaron en Uruguay. En la Figura 3.4 se observa el prototipo final cuyo tamaño es de 50,8 mm x 53,1 mm.

El costo por equipo es de aproximadamente 57 dólares donde el 70% del costo de cada equipo es debido al sensor de CO₂. En la Tabla 3.4 se presenta el desglose del costo de los componentes principales del dispositivo. El ítem “Otros” incluye los elementos complementarios como LEDs, capacitores, resistencias y conectores. El cálculo fue realizado utilizando los precios de referencia del año 2024, considerando una producción de 65 unidades.

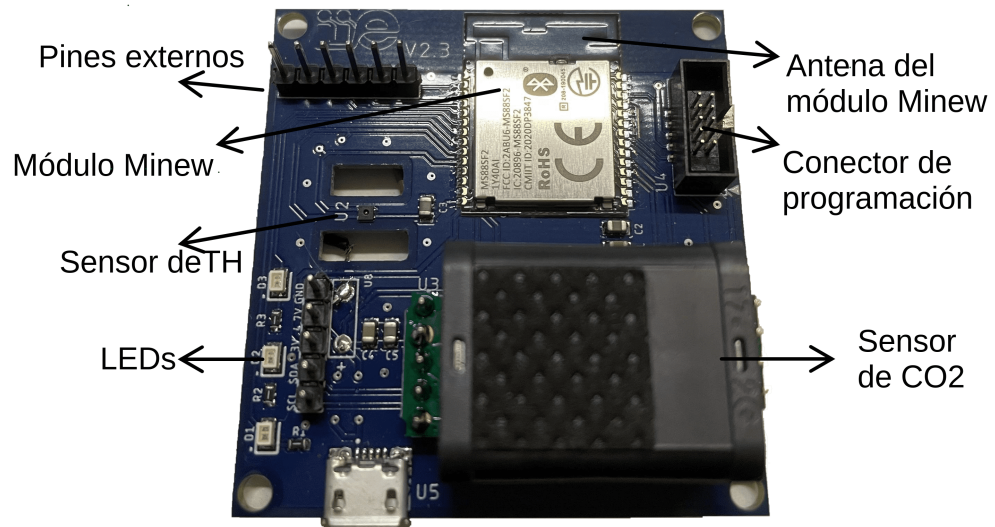


Figura 3.4: Diseño del dispositivo utilizado.

Tabla 3.4: Costo de los principales componentes.

Componente	Costo (USD)
Minew MS88SF2	8,8
Sensor de CO ₂ Sunrise	39,90
Sensor de TH SHT4x	1,12
Fabricación y ensamble PCB	2,81
Otros	4,10
Total	56,73

3.4. Firmware

El firmware fue desarrollado mediante Zephyr [33], un sistema operativo en tiempo real (RTOS) de código abierto diseñado para dispositivos embebidos. La elección de este RTOS para el desarrollo se basa en las siguientes razones:

- El uso de un RTOS facilita el desarrollo de aplicaciones con múltiples tareas.
- Implementación nativa del protocolo BLE Mesh, BLE. Esto reduce la necesidad de utilizar bibliotecas externas o de implementaciones propias de cada fabricante.
- Es de código abierto, lo que permite examinar en detalle las implementaciones.
- Compatibilidad con las arquitecturas más populares y miles de placas de desarrollo. El código es independiente de la plataforma de hardware.

Capítulo 3. Redes BLE y BLE Mesh para el monitoreo de Calidad del Aire

- Amplia gama de material de aprendizaje disponible, ejemplos y tutoriales.
- La implementación del protocolo BLETree fue realizado utilizando Zephyr como se verá en el capítulo 4.

3.4.1. Aplicación

La implementación de la aplicación requirió cuatro tareas con un objetivo específico para cada una:

- **Main:** tarea que se encarga de inicializar los diferentes módulos. Primero lee los valores de configuración de Flash, configura e inicializa los sensores. Luego inicializa la radio, con el protocolo utilizado (BLE, BLE Mesh), la tarea no se ejecuta más.
- **Acquire_task:** tarea productora, responsable de la adquisición de datos de los sensores. La tarea permanece en estado *sleep* hasta que se cumpla el tiempo de frecuencia de muestreo, utiliza el patrón *power-save super loop*. Al despertarse, lee los valores de los sensores y coloca la información en una cola de mensajes que será leída por la tarea **send_task**.
- **Send_task:** tarea consumidora de datos, encargada del envío. La tarea permanece en *sleep* hasta recibir algún mensaje en la cola de mensajes. El envío se gestiona a través de radio según el protocolo utilizado. Si el receptor responde, se activa el LED naranja; de lo contrario, se enciende el LED rojo.
- **Task_configuration:** tarea que se encarga de la configuración del nodo sensor. Permanece en estado *sleep* hasta la recepción de un mensaje. Algunos de ellos son: cambio en la frecuencia de muestreo, habilitación de los LEDs de depuración, configuración de los sensores, reiniciar el dispositivo, etc.

En la Figura 3.5 se observa un diagrama de flujo de las tareas **Acquire_task**, **Send_task** y **Task_configuration**.

3.4. Firmware

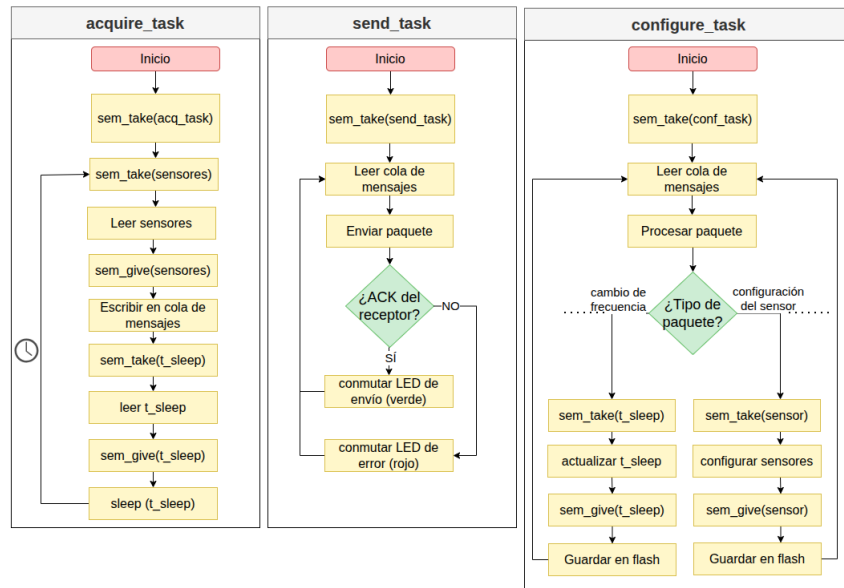


Figura 3.5: Diagrama de flujo de las diferentes tareas de la aplicación.

La implementación de los módulos que interactúan con la aplicación se basó en la programación orientada a objetos (POO). En la Figura 3.6 se observa el diagrama de clases simplificado con sus principales atributos y métodos. Debido a las capas de abstracciones que se implementaron, esta aplicación se puede usar fácilmente en diferentes protocolos, y no hubo que implementar grandes cambios tras cambiar de protocolo, BLE o BLE Mesh.

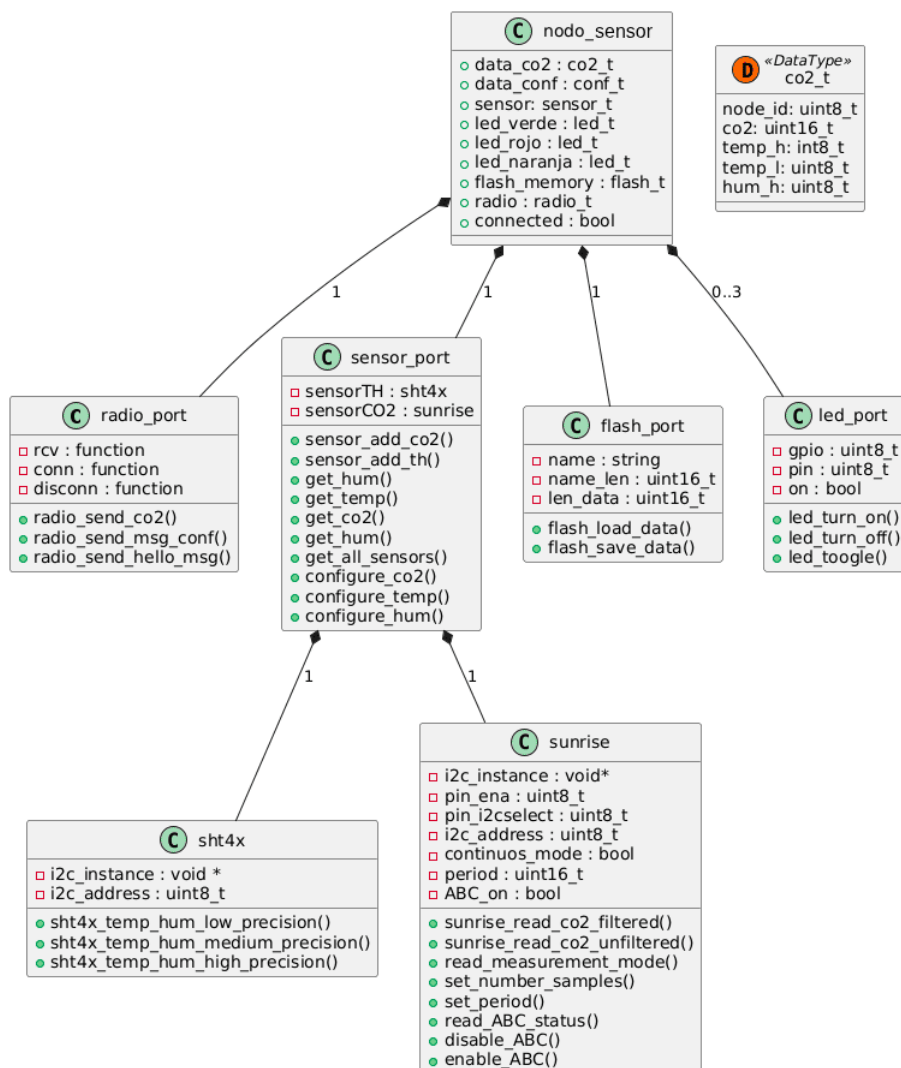


Figura 3.6: Diagrama de clases con sus atributos y métodos.

3.5. Base de datos y visualización

3.5.1. Base de datos

Para la base de datos y visualización se utilizó una Raspberry Pi 3B el cual cumple con los siguientes objetivos:

- Actuar como base de datos para almacenar la información recibida.
- Actuar como servidor web para visualizar los datos en tiempo real.
- Verificar el correcto funcionamiento de la comunicación con el concentrador central.

3.5. Base de datos y visualización

- Configurar la red inalámbrica.
- Realizar el respaldo de los datos mediante SSH.

Un script desarrollado en Python se encarga de almacenar los datos, verificar que la comunicación entre el concentrador central y la Raspberry Pi esté establecida, y configurar la red. La implementación se divide en varios *threads* cada uno responsable de una tarea. El *thread main* establece la conexión con el concentrador central mediante USB y gestiona el almacenamiento. Recibe los datos de los nodos medidores (ID, CO₂, temperatura y humedad y los parámetros de la red) e información de depuración. Los datos se almacenan en un archivo CSV que tiene como *headers*: Time, ID, CO2, Temperatura, Humedad. La información de red se almacena en un formato CSV, mientras que la información de depuración en un formato .txt. Cada archivo generado tiene como nombre la fecha del día más un identificador. En la Figura 3.7 se observan los diferentes directorios y la nomenclatura de los archivos.

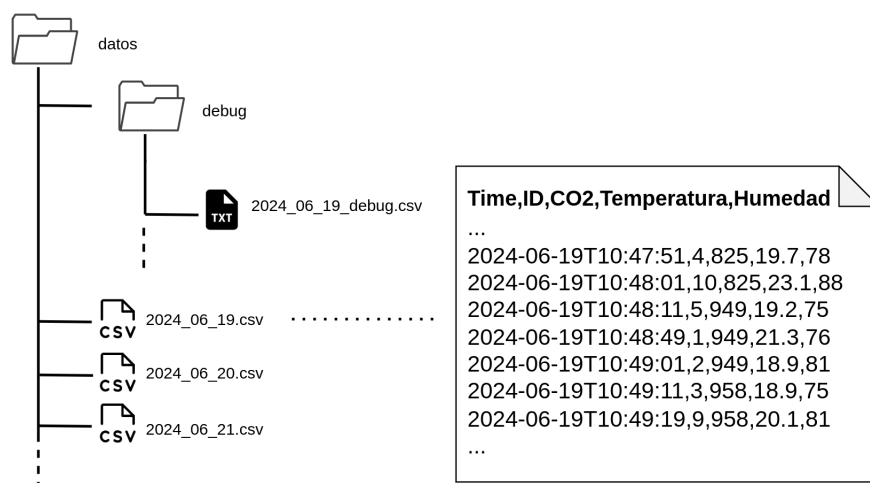


Figura 3.7: Distribución de carpetas para el almacenamiento de datos.

El *thread write_msg* se encarga que la Raspberry Pi y el concentrador central puedan comunicarse. Para eso ambos dispositivos se intercambian mensajes cada 10 segundos. Si alguno de los dos no recibe un mensaje durante 60 segundos, se reinicia.

El *thread cmd* verifica si hay comandos pendientes para enviar. Estos comandos, almacenados en un archivo de texto por el *script comandos.py*, se envían por USB.

El *script respaldo.sh* gestiona el respaldo de datos a través de rsync (herramienta de sincronización de archivos remotos y locales), mediante el envío de archivos CSV a una PC en la FING. El *script* se ejecuta cada 10 horas a través de crontab (utilidad en sistemas Unix y Linux que permite programar tareas para que se ejecuten automáticamente en horarios específicos). Para el respaldo remoto, se habilitó SSH, ya que es el protocolo utilizado por rsync para la transferencia de archivos.

3.5.2. Visualización de datos

Para visualizar en tiempo real los datos de CO₂, temperatura y humedad, se desarrolló una aplicación web basada en Flask, un *framework* de Python. Esta aplicación se ejecuta en la Raspberry Pi, que actúa como servidor web, y se encarga de leer los archivos CSV correspondientes a la fecha actual para obtener la información necesaria y generar las visualizaciones en tiempo real

En la Figura 3.8 se observa la página principal del sitio web. Aquí, se pueden visualizar los niveles de CO₂, temperatura y humedad de cada salón de la escuela. Los datos están acompañados por un código de color que indica qué tan alta está la concentración de CO₂. Un color verde para concentraciones por debajo de 1000 ppm, un color amarillo entre 1000 ppm y 2000 ppm y un color rojo para mayores de 2000 ppm. Además, se ofrece la opción de acceder al historial de datos.



Figura 3.8: Página de inicio.

3.5. Base de datos y visualización

En la Figura 3.9, se presenta una gráfica de datos de CO₂, luego de presionar el botón "Ver Gráfico".

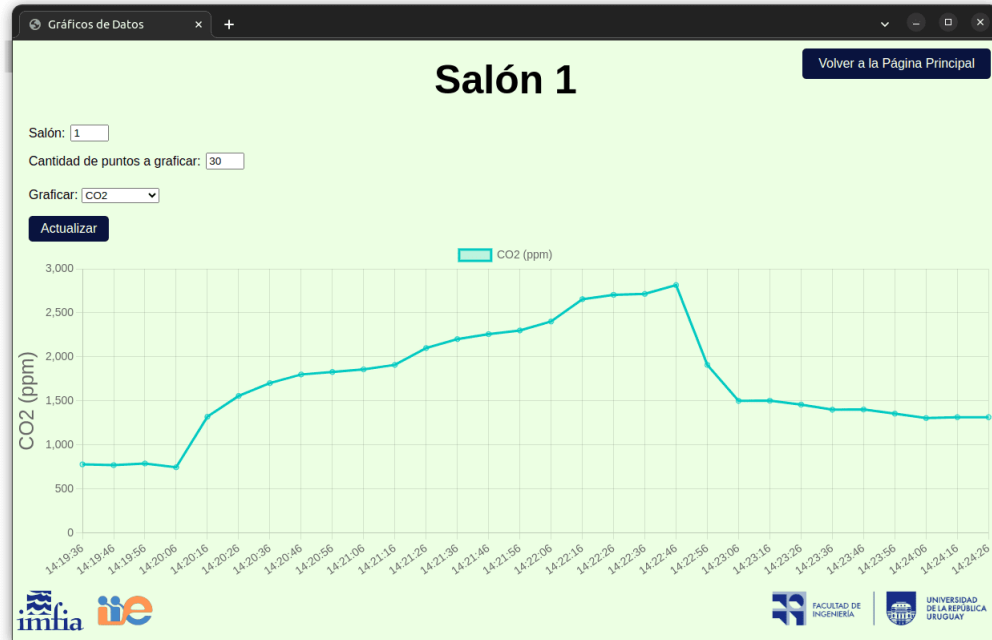


Figura 3.9: Página para visualizar el historial de datos de un salón.

La interfaz permite seleccionar la cantidad de puntos a graficar desde el último dato recibido, elegir la variable a visualizar (CO₂, temperatura o humedad) y cambiar de salón sin necesidad de regresar a la página principal. La gráfica se actualiza automáticamente cada vez que se detecta un nuevo dato.

La página web desarrollada permitió instalar *tablets* en los salones con el fin de mostrar en tiempo real los niveles de CO₂, facilitando la decisión de cuándo ventilar. Para garantizar su funcionamiento continuo y evitar que la aplicación fuese cerrada o modificada, se implementó un modo *kiosco*, configuración de seguridad que bloquea un dispositivo para que funcione con una sola aplicación o un conjunto limitado de aplicaciones en pantalla completa. Por último, la aplicación cuenta con mecanismos de reconexión automática en caso de pérdida de conexión Wi-Fi y realiza varios intentos de recuperación ante errores, evitando la necesidad de intervención manual o reconfiguración del sistema.

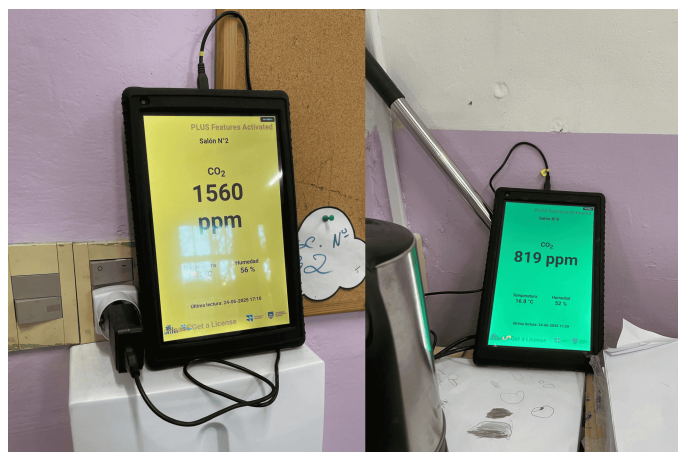


Figura 3.10: Tablet para monitorear la calidad del aire.

3.6. Sistema BLE

Este sistema, sistema de análisis específico, fue implementado para estudiar el comportamiento del CO₂ en ambientes de dimensiones acotadas, como un salón de clase. El objetivo principal fue analizar cómo varía la concentración de CO₂ en distintos puntos de un salón. Para ello, se dispusieron múltiples nodos sensores en diferentes ubicaciones dentro del salón, de forma que cada uno registrara los valores locales de CO₂, temperatura y humedad.

Dado que el área de cobertura se encuentra dentro del rango típico de comunicación del protocolo BLE, se optó por esta tecnología por su bajo consumo energético y simplicidad de implementación.

El sistema básicamente es el descrito anteriormente, el cual consta de una red de nodos BLE que envían la información de CO₂, temperatura y humedad al nodo base, Figura 3.11.

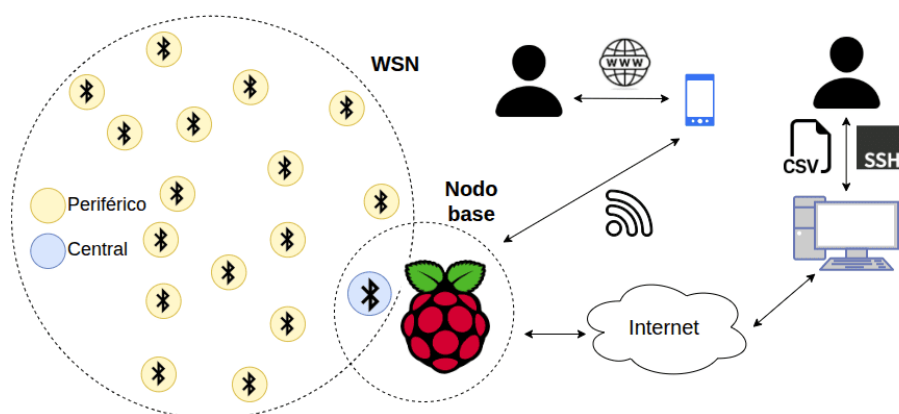


Figura 3.11: Sistema de medición BLE.

3.7. Sistema BLE Mesh

Este sistema se instaló en un salón de una escuela como se observa en la Figura 3.12 con un total de 13 nodos sensores.

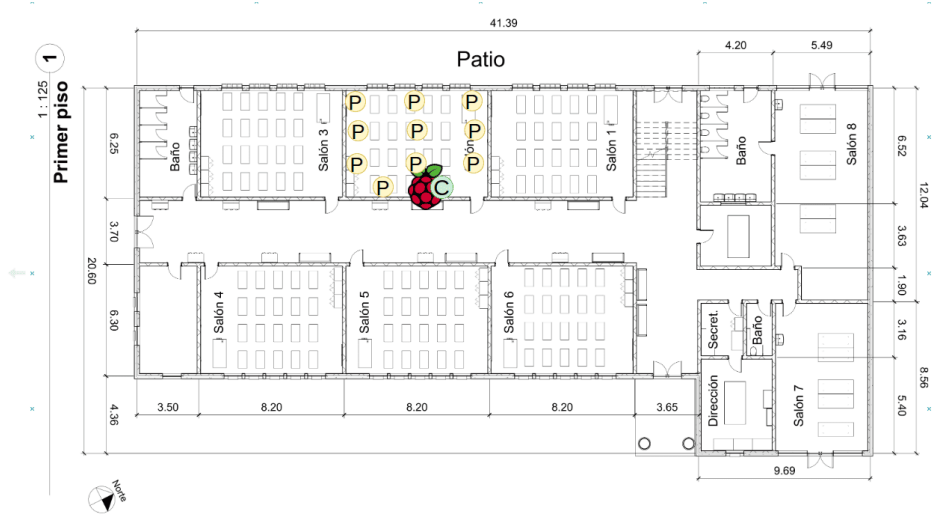


Figura 3.12: Distribución de la red BLE en un salón.

3.7. Sistema BLE Mesh

El sistema BLE Mesh fue implementado para medir la calidad del aire en ambientes de mayor extensión, donde la comunicación en estrella de BLE resulta insuficiente debido a su alcance limitado. En este caso, se buscó disponer de un nodo sensor por salón, sistema de monitoreo general. Esta red se implementó en dos escuelas. La arquitectura general del sistema se mantiene similar a la descrita en la sección anterior, como se observa en la Figura 3.13.

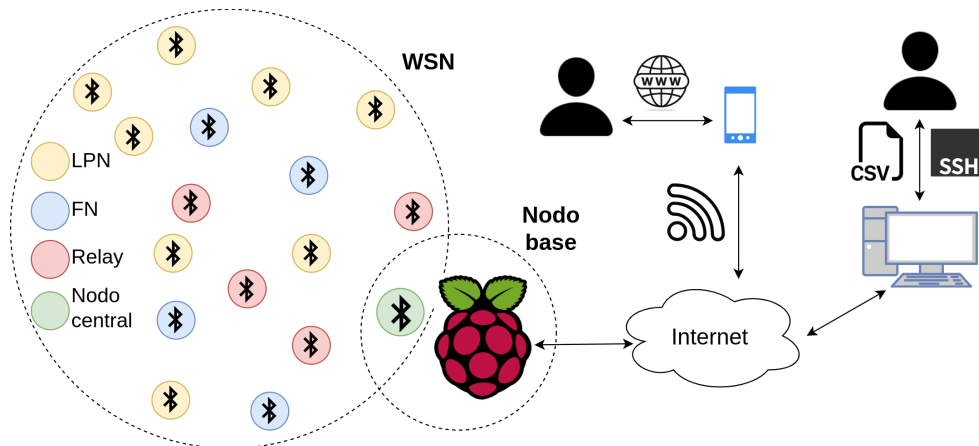


Figura 3.13: Sistema de medición BLE Mesh.

Capítulo 3. Redes BLE y BLE Mesh para el monitoreo de Calidad del Aire

El protocolo BLE Mesh fue seleccionado por su capacidad de extender la cobertura a través del reenvío de mensajes entre nodos, permitiendo la comunicación entre dispositivos separados por distancias que exceden el rango típico del enlace BLE directo. Esta característica lo hace adecuado para aplicaciones distribuidas dentro de edificaciones con varios salones y pisos, como las escuelas utilizadas en este estudio.

Esta conformada por una red en este caso BLE Mesh donde los nodos sensores encargados de medir CO₂, temperatura y humedad son nodos LPN.

Como se mencionó, la instalación se realizó en dos escuelas. En la primera escuela se desplegó una red conformada por 18 nodos LPN (nodos sensores), 5 nodos *relay*, 5 nodos FN y un nodo central conectado a la Raspberry Pi. En las figuras 3.14 y 3.15 se puede observar la distribución de la red en una de las escuelas entre los pisos 1 y 2 respectivamente.

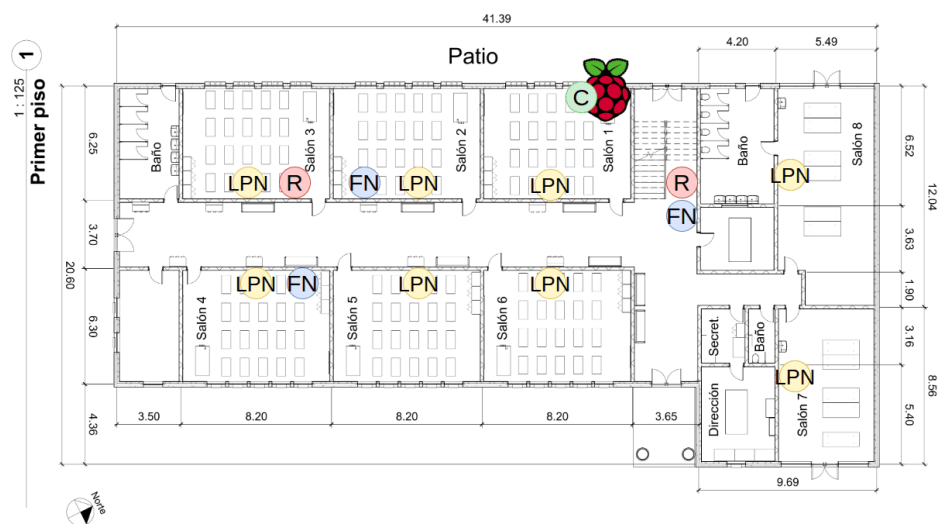


Figura 3.14: Distribución de la WSN BLE Mesh en el primer piso.

3.7. Sistema BLE Mesh

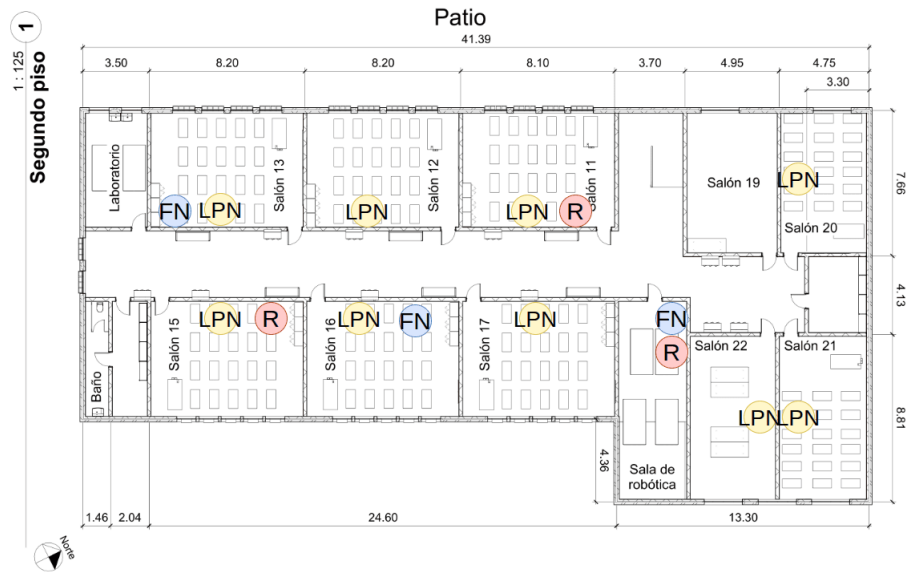


Figura 3.15: Distribución de la WSN BLE Mesh en el segundo piso.

En la segunda escuela, la gran distancia entre algunos salones y el nodo base, así como la falta de enchufes accesibles, impidieron la instalación de nodos relay en el área. Para solucionar este problema, se instalaron dos WSN independientes como se observa en la Figura 3.16, cada una con su propia Raspberry Pi. Una transfiere los datos a la otra, para centralizar toda la información en una sola ubicación.

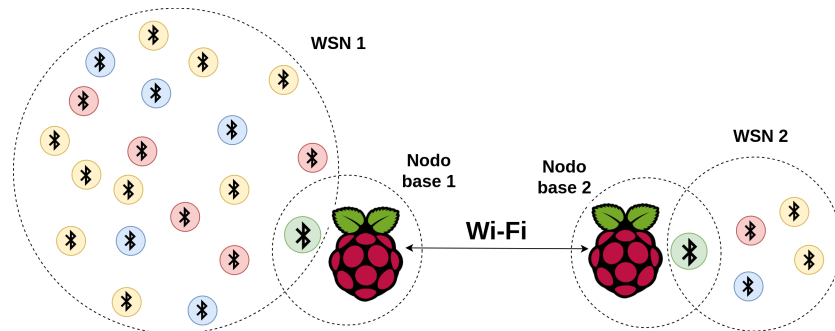


Figura 3.16: Arquitectura de doble WSN para resolver el problema de alcance.

Así, la segunda escuela cuenta con dos redes. La primera está compuesta por 12 nodos LPN, 3 nodos relay, 4 nodos FN y un nodo base. La segunda incluye 2 nodos LPN, 1 nodo relay, 1 nodo FN y un nodo base.

La falta de enchufes accesibles en determinados salones, sumada al elevado consumo de los nodos relay, debido a que deben mantener la radio encendida de forma permanente, motivó el desarrollo del protocolo BLETree. Este nuevo protocolo busca superar las limitaciones observadas en las redes BLE y BLE Mesh,

Capítulo 3. Redes BLE y BLE Mesh para el monitoreo de Calidad del Aire

y se analiza en detalle en el Capítulo 4.

Capítulo 4

Diseño del Protocolo BleTree

En este capítulo se presenta el diseño e implementación del protocolo BLETree, desarrollado a partir de las capacidades del protocolo BLE. Este protocolo surge como una evolución de las redes implementadas en los estudios descritos en el Capítulo 3, con el objetivo de superar las limitaciones observadas en BLE y BLE Mesh en términos de consumo energético y escalabilidad.

El capítulo inicia introduciendo los conceptos de multilink y multirole, fundamentales para la construcción de topologías jerárquicas dentro de una red BLE. Luego, se describe la elección de la topología en árbol y las ventajas que ofrece para aplicaciones de monitoreo ambiental.

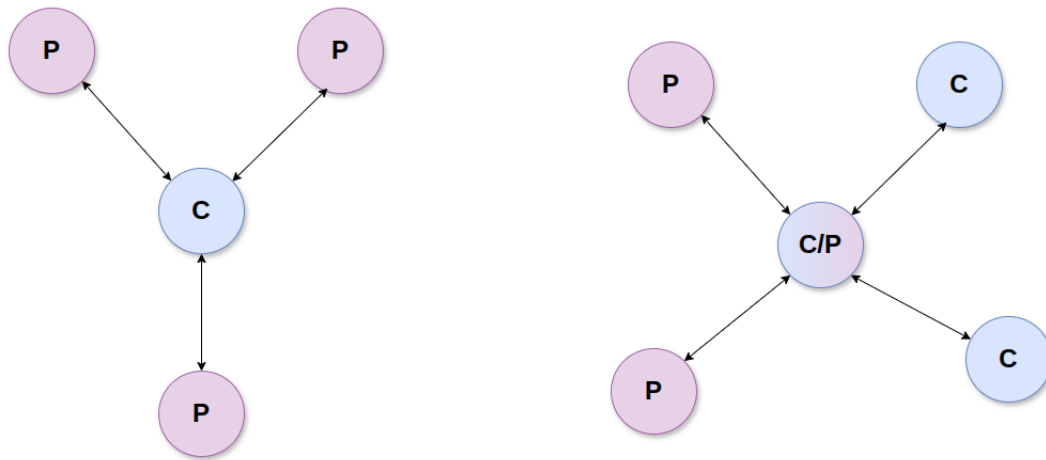
A continuación, se detalla el proceso de formación dinámica del árbol, incluyendo los mecanismos de selección de padres e hijos, el mantenimiento de la estructura y las estrategias adoptadas para reducir el consumo energético durante la conexión y actualización de nodos.

Finalmente, se describen los servicios y características definidos para el intercambio de información y la arquitectura del firmware implementado, basada en una estructura modular sobre el sistema operativo en tiempo real Zephyr.

4.1. Conceptos Multirol y Multilink

Como se mencionó en el Capítulo 2, los dispositivos BLE orientados a conexión pueden mantener múltiples conexiones y además, un mismo dispositivo puede comportarse como un periférico y central al mismo tiempo, Figura 4.1. Al combinar ambos conceptos es posible construir topologías de red más extensas, como se muestra en la Figura 4.2 y aumentar el alcance de la red. En la Figura 4.3 se observan topologías que se pueden construir con estos conceptos. Mencionar que a partir de BLE 4.1 (2013) se introduce oficialmente el soporte de roles múltiples simultáneos. A partir de esta versión un dispositivo puede, por ejemplo, mantener una conexión como periférico y al mismo tiempo iniciar otra conexión como central [34].

Capítulo 4. Diseño del Protocolo BleTree



(a) Multilink.

(b) Multirole.

Figura 4.1: Conceptos de multilink y multirole. C = central, P = periférico.

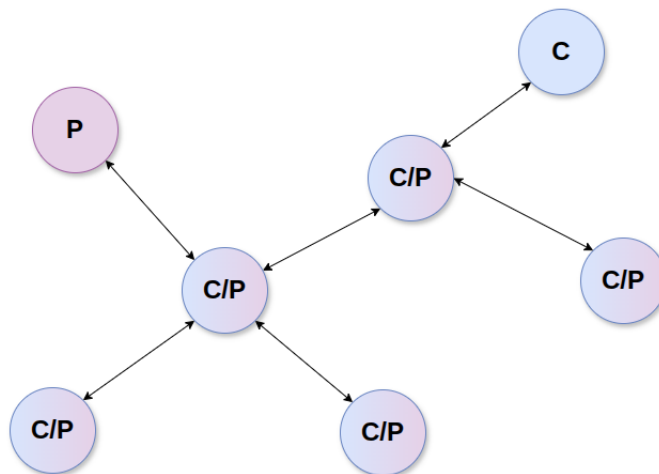


Figura 4.2: Multirole y Multilink para extender topología de la red BLE.

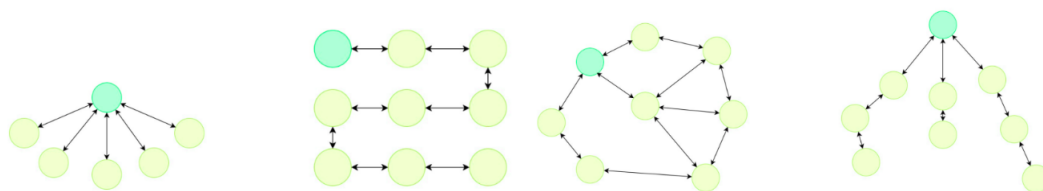


Figura 4.3: Diferentes topologías con los conceptos de multilink y multirole.

4.2. Topología árbol

Para el desarrollo de este trabajo se decidió por emplear una topología en árbol, una estructura más sencilla que una Mesh, pero adecuada para aplicaciones de monitoreo. En este caso solo se requiere que los nodos que recolectan la información reporten a un nodo central y que el central se comunique con los nodos recolectores para establecer algún tipo de configuración. En este tipo de aplicación no se necesita que los nodos recolectores se comuniquen entre ellos.

La topología en árbol presenta una estructura jerárquica donde un nodo *root*, o nodo raíz se conecta con otros nodos, que a su vez pueden conectarse con nodos adicionales en niveles sucesivos como se observa en la Figura 4.4. Una característica de la topología árbol es que siempre existe un único camino entre dos nodos cualesquiera, difiriendo de la red Mesh en la cual pueden haber múltiples caminos diferentes para conectar dos nodos.

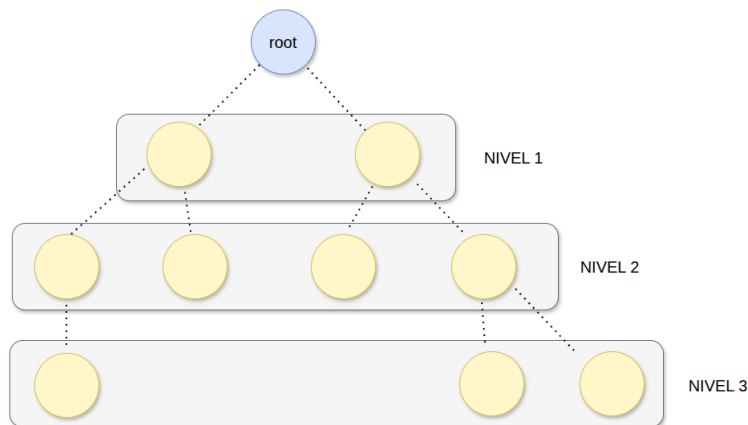


Figura 4.4: Ejemplo de topología en árbol de 3 niveles.

4.3. Diseño General de la Solución

El diseño plantea una estructura de árbol dinámica que comienza con un nodo *root*, el cual actúa como punto de inicio. Desde allí se propagan los mensajes al resto de la red, los dispositivos que los reciben se incorporan como hijos del *root*. A su vez, estos nuevos nodos que se incorporaron pueden permitir que otros dispositivos se unan a través de ellos, formando así la topología de árbol. Los nodos mantienen conocimiento de su nodo padre y de sus nodos hijos, y su nivel, a qué altura del árbol están, que está determinado por la cantidad de saltos que los separa del nodo *root*. La selección de un nodo padre puede basarse en varias variables, como el número de saltos hasta el *root*, el indicador de intensidad de señal recibida (RSSI), la tasa de pérdida de paquetes o el número de conexiones. Si un nodo pierde la conexión con su padre, buscará un nuevo nodo padre. Además, si un nodo descubre otro con un rango inferior, cambiará a este nuevo padre.

Capítulo 4. Diseño del Protocolo BleTree

Esta implementación se inspira en el protocolo RPL, el cual crea una topología en árbol donde a cada nodo se le asigna un rango que aumenta a medida que se alejan del nodo raíz. Este protocolo definido en la RFC 6550, [35], es actualmente uno de los protocolos de enrutamiento más utilizados en redes inalámbricas de sensores que operan sobre 6LoWPAN. RPL fue diseñado específicamente para redes de baja potencia y enlaces poco confiables, permitiendo la construcción de una topología en forma de *Directed Acyclic Graph* (DAG), típicamente orientado a un destino único denominado *root*. Este protocolo es capaz de organizar los nodos en una estructura jerárquica con redundancia.

4.4. Formación del árbol

La construcción del árbol utilizando BLE *multirole* y *multilink* se basa en lo siguiente, cuando un nodo se une al árbol, inicialmente asume un rol periférico, enviando mensajes de *advertising* con su rango. Un nodo que busca unirse al árbol adopta un rol central, escaneando mensajes de *advertising* de otros nodos. Una vez establecida la conexión, el nuevo nodo cambia a rol periférico y comienza a emitir su rango a través de mensajes de *advertising*, lo que permite la conexión de más nodos.

Para la asignación de rangos, la implementación utiliza el número de saltos hasta la raíz, el nivel de RSSI y la cantidad de conexiones. En los casos en que los nodos se encuentran a igual distancia, se prefiere aquel con menor número de conexiones. Además, si el RSSI es bajo, se evita establecer conexión con él debido a que puede entrar en un ciclo de conexión desconexión por la poca intensidad de señal. La tasa de pérdida de paquetes no se utiliza debido a que BLE no puede informar múltiples intentos de envío de un paquete hasta que se recibe confirmación.

En esta implementación se definen tres tipos de nodos, cada uno asignado a un rol de BLE en función de su posición dentro del árbol, como se muestra en la Figura 4.5.

- Nodo *root*: actúa como raíz del árbol con un rol periférico.
- Nodo intermedio: tiene un rol tanto como periférico como central, apareciendo en diferentes niveles dentro del árbol.
- Nodo *leaf*: asume un rol central y deja de anunciarse una vez que encuentra a su nodo padre, optimizando así el consumo energético.

Esta estructura jerárquica y la capacidad de desempeñar múltiples roles permiten una formación y expansión eficiente de la red en árbol, manteniendo un bajo consumo de energía y extendiendo la cobertura de BLE.

La decisión de que un nodo que desea unirse comience como central y luego pase a periférico se basa en el costo energético. Mantener la radio en recepción, RX, para escanear resulta más costoso que transmitir mensajes *advertising* de forma periódica. Por eso, los nodos que ya forman el árbol permanecen como periféricos

4.4. Formación del árbol

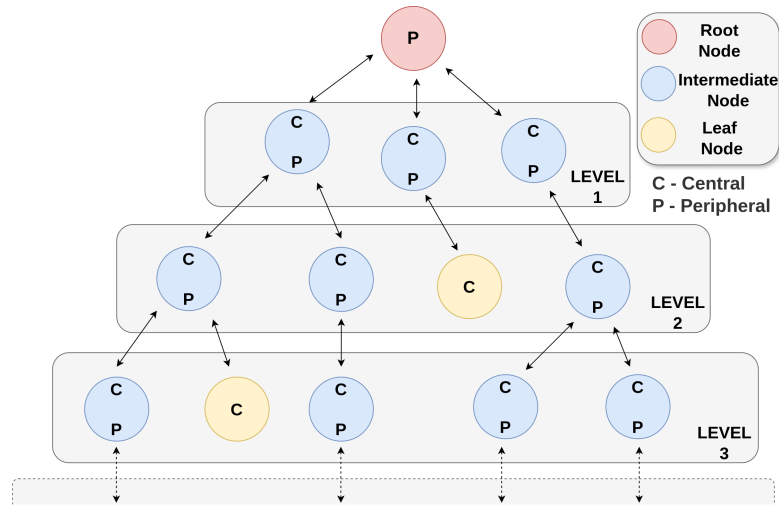


Figura 4.5: Diferentes tipos de nodos en BLETree.

anunciando, y el nodo que quiere unirse adopta temporalmente el rol central para descubrir esos anuncios e iniciar una conexión. Si fuese al revés, cada nodo del árbol debería permanecer en escaneo continuo, con un consumo mucho mayor. En la Figura 4.6 y 4.7 se observan los dos casos, se omiten los intercambios de mensajes para establecer la conexión. En la Figura 4.6, se muestra el caso en que un nodo que ya forma parte del árbol envía periódicamente mensajes *advertising* y mantiene su radio apagada el resto del tiempo, reduciendo así el consumo energético. En cambio, en la Figura 4.7, el nodo debe mantener su radio encendida a intervalos regulares para escuchar posibles mensajes *advertising* de otros nodos. Esto implica un mayor consumo, ya que debe permanecer en modo de recepción durante un tiempo al menos igual al período de *advertising* del otro nodo; de lo contrario, podría no producirse ninguna coincidencia temporal entre ambos y la conexión nunca llegaría a establecerse.

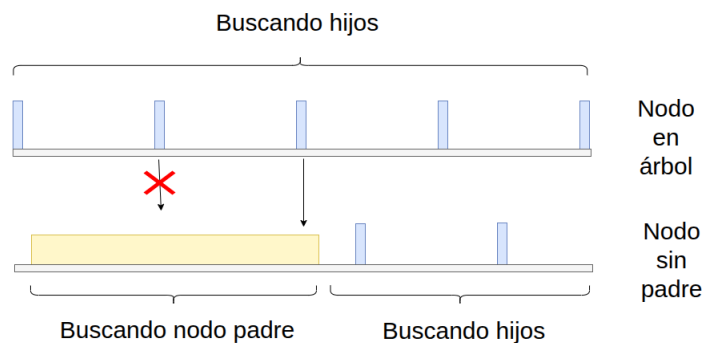


Figura 4.6: Caso en el que un nodo unido al árbol envía mensajes para buscar nodos hijos.

Capítulo 4. Diseño del Protocolo BleTree

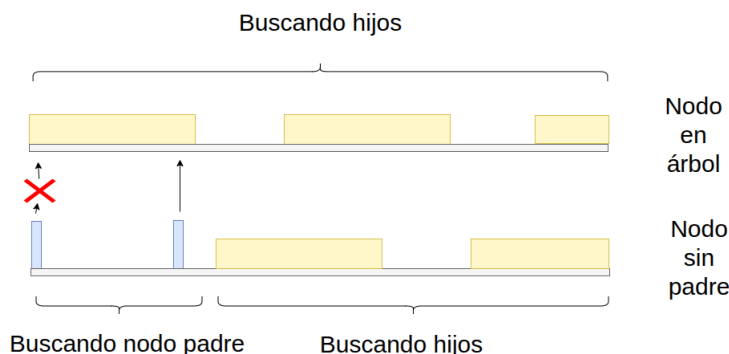


Figura 4.7: Caso en el que un nodo unido al árbol espera recibir mensajes para encontrar nodos hijos.

4.4.1. Conexión con Padre

En la Figura 4.8 se observa el diagrama de estados para el proceso de búsqueda y conexión con un nodo padre. Cuando un nodo desea unirse a la red, este inicia con un rol central a la espera de recibir mensajes de *advertising* de nodos que ya forman parte del árbol. Los mensajes de *advertising* que envían los nodos unidos a la red tienen la información con un UUID específico del servicio BleTree.

Debido al UUID se puede diferenciar los mensajes *advertising* de nodos pertenecientes a BLETree de aquellos provenientes de otros dispositivos BLE. Una vez que detecta el primer *advertising*, el nodo pasa al estado SCANNING NEIGHBORS, en el cual recopila información de todos los mensajes recibidos durante un tiempo configurable, este tiempo debe ser por lo menos mayor al período de envío de mensajes por los nodos de la red, esto permite que el nodo almacene todos los nodos que están a su alcance, por ejemplo si solo se queda con el primer mensaje que recibe, no podría hacer una evaluación del mejor padre. Los datos almacenados incluyen: dirección del nodo, RSSI, número de saltos hasta la raíz y cantidad de conexiones disponibles. Al expirar el temporizador, el nodo selecciona como padre aquel con menor rango, definido principalmente por la distancia en saltos hasta la raíz. En caso de empate, se prioriza el nodo con menor número de conexiones activas. Una vez identificado el candidato, el nodo espera una solicitud de conexión del mismo, estado SCANNING ADDRESS. Si la conexión no se concreta en un determinado tiempo, el proceso se reinicia desde el escaneo inicial. Una vez establecida la conexión, se inicia el proceso de descubrimiento de servicios y características, estados DISCOVERING y DISCOVERED, incluyendo el intercambio de identificadores (ID). Con este paso finalizado, el nodo pasa al estado READY y cambia a rol periférico, habilitando así la posibilidad de recibir conexiones de nodos hijos. A partir de ahora este nodo envía mensajes *advertising* anunciando que el árbol puede seguir extendiéndose. Si la conexión con el padre se pierde, el proceso se reinicia automáticamente para garantizar la reconfiguración del árbol.

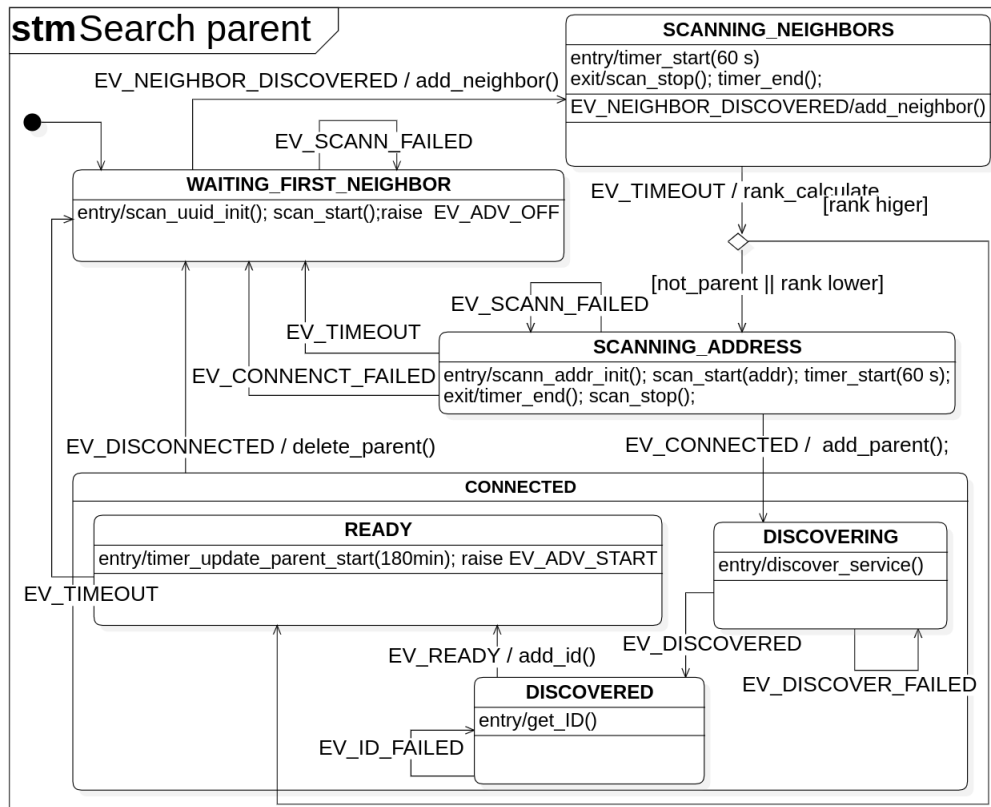


Figura 4.8: Diagrama de estados para la búsqueda del nodo padre.

4.4.2. Conexión con Nodos Hijos

En la Figura 4.9 se observa el diagrama de estados para el proceso de búsqueda y conexión con nodos hijos. Tras la conexión con el nodo padre, y siempre que el nodo no sea un nodo *leaf* ni se supere la profundidad máxima del árbol, éste comienza a funcionar como periférico, emitiendo mensajes de *advertising* a intervalos configurables. Los estados oscilan entre ADV OFF y ADV ON, regulando el ciclo de anuncio.

Cuando un nodo hijo potencial responde, se inicia el descubrimiento de servicios y características, estados ADV DISCOVERING y ADV DISCOVERED, seguido del intercambio de ID. Al completarse este proceso, el nodo regresa al estado ADV OFF, volviendo a repetir el proceso para buscar nuevos posibles nodos hijos.

En escenarios donde múltiples nodos hijos detectan simultáneamente un anuncio, la conexión se otorga al nodo que envíe más rápido la solicitud, mientras que los demás esperan al siguiente ciclo de *advertising*.

En la Figura 4.10 se presenta el diagrama de secuencia correspondiente a un escenario en el que el nodo C busca unirse al árbol. En este proceso, los nodos A y B ya pertenecen a la red y actúan como posibles padres. Primero, el nodo C recibe mensajes *advertising* del nodo A, de rango 4, lo que activa su temporizador

4.4. Formación del árbol

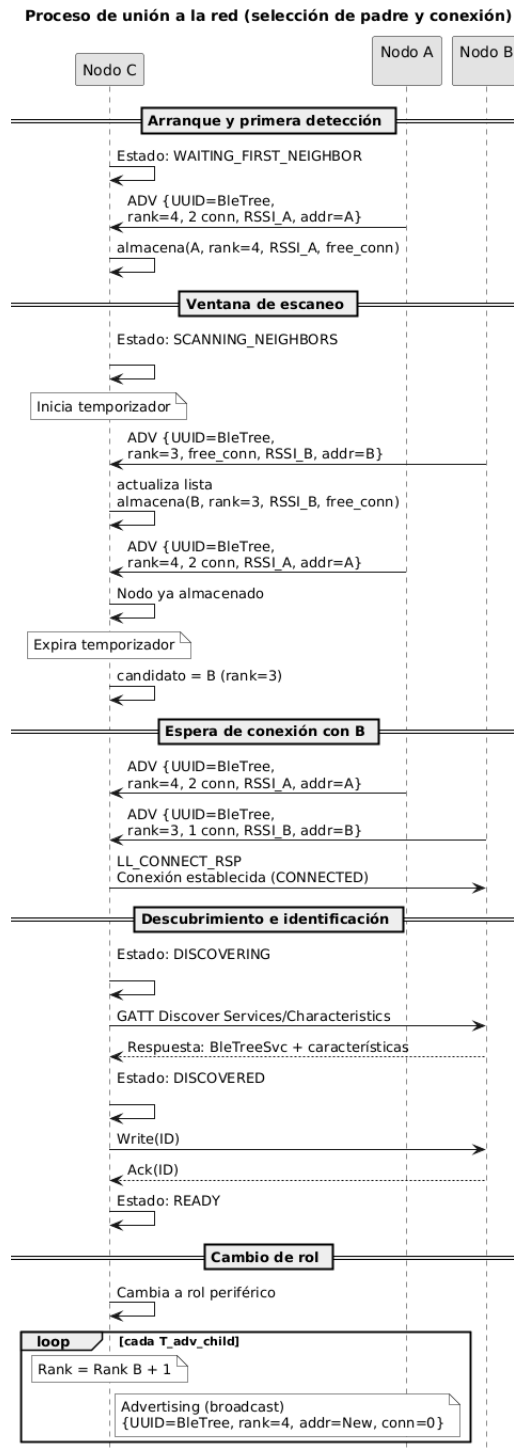


Figura 4.10: Diagrama de secuencia para la integración de un nodo al árbol.

4.5. Mantenimiento y Actualización

Para adaptarse a variaciones en el entorno (fallos, movilidad, degradación de enlaces), los nodos ejecutan periódicamente un procedimiento de actualización, con frecuencia configurable. Este procedimiento reevalúa la disponibilidad de padres más óptimos y, si es necesario, reconfigura la relación padre-hijo, notificando a los nodos superiores. Pero, esta característica implica un alto consumo en la red, debido a que los nodos deben encender su radio para analizar si se presentan nuevos padres con distancias más cerca. Una actualización de mayor frecuencia implicaría un consumo elevado. Esto se discute en el Capítulo 5 en Caracterización del consumo BLETree.

4.6. Servicios y características

En BLE, la comunicación entre dispositivos se organiza mediante el perfil GATT (Generic Attribute Profile). GATT define cómo se estructuran y se intercambian los datos a través de servicios y características. Cada servicio agrupa un conjunto de características, y cada característica tiene propiedades como lectura, escritura o notificación. Para el desarrollo de BLETree se utilizaron dos servicios principales:

- Servicio BLETree: destinado a la configuración y mantenimiento de la red en forma de árbol (asignación de *rank*, padre, etc.).
- Servicio UART sobre BLE: destinado al intercambio de información.

A continuación, Tabla 4.1 y 4.2, se describen las características de cada servicio.

Tabla 4.1: Características principales del servicio BLETree.

Característica	Propiedades	Descripción
Device ID	Read	Identificador único del nodo dentro del árbol.
Rank	Read / Write	Distancia al <i>root</i> .
ParentID	Read / Write	ID del padre.

Tabla 4.2: Características principales del servicio UART sobre BLE.

Característica	Propiedades	Descripción
RX	Write	Permite que el cliente GATT escriba datos en el servidor.
TX	Notify	Permite que el servidor GATT envíe datos o notificaciones al cliente.

4.7. Algoritmo para el intercambio de mensajes dentro del árbol

Una vez establecida la topología en forma de árbol, es necesario definir el mecanismo mediante el cual se realizará el intercambio de mensajes a nivel de capa de aplicación entre los nodos de la red. En este protocolo, se determinó que la comunicación se efectúe únicamente entre el nodo raíz y los nodos del árbol (*root-nodo* y *nodo-root*), evitando la comunicación directa entre distintos nodos.

Esta decisión responde a los requerimientos de la aplicación, dado que en sistemas de monitoreo el objetivo principal es reportar los datos hacia un nodo central. De esta manera, la comunicación desde el nodo central hacia los nodos individuales se limita únicamente a tareas de configuración. Por lo tanto, no resulta necesario habilitar el intercambio de información a nivel de aplicación entre nodos.

Por lo tanto, cuando un nodo recibe un mensaje, primero verifica su origen. Si el mensaje proviene de un nodo ubicado aguas abajo, se interpreta que está destinado al nodo raíz, por lo que el nodo lo retransmite hacia su padre en el árbol. En cambio, si el mensaje proviene del nodo padre, el nodo comprueba si el destinatario es él mismo; de no ser así, reenvía el mensaje a todos sus nodos hijos.

4.8. Firmware desarrollado para el protocolo

El protocolo fue implementado utilizando nRF Connect SDK, el cual se basa en el sistema operativo en tiempo real Zephyr. A partir de las primitivas de comunicación BLE que ofrece el SDK, se construyó una capa superior que define el protocolo propio, denominado BLETree.

El diseño se organizó en capas modulares, donde cada una cumple una función específica dentro del sistema, tal como se muestra en la Figura 4.11.

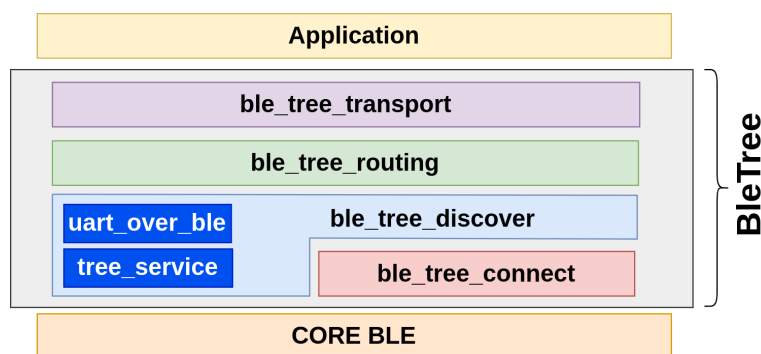


Figura 4.11: Diagrama de capas del firmware BLETree.

La capa *ble_tree_connect* es responsable de establecer las conexiones dentro del árbol, gestionando la búsqueda de nodos padre e hijos. La capa *ble_tree_discover* se encarga del descubrimiento de servicios, permitiendo la identificación de las características necesarias para el intercambio de datos entre los nodos. Por su

Capítulo 4. Diseño del Protocolo BleTree

parte, la capa *ble_tree_routing* gestiona el enrutamiento de los mensajes dentro de la topología, determinando el camino adecuado hacia cada destino. Finalmente, la capa *ble_tree_transport* se ocupa de la transmisión y recepción de los mensajes.

Capítulo 5

Resultados Experimentales

5.1. Cobertura

Tanto BLE como BLE Mesh comparten la misma capa física lo que significa que ambos operan en la banda ISM de 2,4 GHz, empleando los mismos canales, el mismo tipo de modulación y potencias de transmisión similares. En consecuencia, el alcance físico de un enlace individual es equivalente para los tres protocolos evaluados, BLE, BLE Mesh y BLETree, ya que todos utilizan las mismas condiciones de propagación y hardware de radio. Sin embargo, las diferencias aparecen en la forma en que cada protocolo utiliza la capa física. En BLE estándar, la comunicación se establece mediante enlaces directos entre un nodo central y un nodo periférico, por lo que la cobertura total de la red queda limitada al rango máximo de un solo enlace. En BLE Mesh, aunque cada salto tiene el mismo alcance físico, los mensajes se retransmiten entre los nodos repetidores, lo que permite extender la cobertura efectiva de la red a mayores distancias.

En contraste, BLETree implementa una topología en árbol multihop, donde los nodos actúan de forma jerárquica, estableciendo enlaces punto a punto similares a BLE, pero organizados para que los mensajes puedan propagarse entre niveles. Gracias a esto, BLETree logra una cobertura extendida mayor a BLE y comparable a BLE Mesh.

En las pruebas realizadas, con nodos basados en el nRF52840 y potencia de transmisión de 0 dBm, se observaron alcances de aproximadamente 10 - 15 m por enlace en interiores, manteniendo una comunicación estable. Esta distancia dependía fuertemente de las condiciones presentes en la escuela. Durante los días de instalación realizados fuera del horario escolar, el alcance resultó considerablemente mayor que durante los días de clase. Incluso, las primeras instalaciones fueron funcionales. Sin embargo, durante el horario de clase algunos nodos dejaron de reportar datos. Por este motivo, fue necesario realizar ajustes en los alcances. En una red BLETree con cuatro niveles, la cobertura se multiplicó por cuatro, validando que la topología propuesta permite extender el alcance total sin modificar la capa física ni incrementar el consumo.

5.2. Caracterización del consumo BLETree

En la Figura 5.1 se ilustran las diferentes etapas de operación de la radio de un nodo en el protocolo BLETree. Las mediciones consideraron tres fases principales: eventos de *advertising*, eventos de conexión y ventanas de escaneo. Cada una de estas fases contribuye de manera diferente al consumo total de corriente, dependiendo del rol del nodo (*root*, intermedio o *leaf*) y de la actividad general de la red.

El consumo promedio de corriente de un nodo durante un período T puede estimarse mediante la Ecuación (5.1), la cual modela la contribución de cada evento de radio dentro de dicho intervalo:

$$I_{avg} = \frac{1}{T} (A \cdot t_{adv} \cdot I_{adv} + C \cdot t_{conn} \cdot I_{conn} + S \cdot t_{scan_w} \cdot I_{scan_w} + t_s \cdot I_s) \quad (5.1)$$

Donde T representa el período correspondiente al intervalo más largo entre repeticiones de cualquier evento de radio (típicamente la frecuencia de escaneo, expresada en milisegundos). Los parámetros A , C y S indican la cantidad de veces que ocurren los respectivos eventos dentro del período T :

- A : número de mensajes de *advertising* enviados, calculado como $A = T/[f_{adv}/(t_{adv}/t_{int_adv})]$
- C : número de eventos de conexión, definido por $C = N_{conn} \cdot T/t_{conn_int}$
- S : número de ventanas de escaneo activas, dado por $S = t_{scan}/t_{int_scan}$ (En el caso de consumo sin actualizaciones o en reposo, $S = 0$)

Esta formulación permite extrapolar el consumo energético para distintos escenarios, considerando la frecuencia de los eventos de radio y la duración de cada uno de ellos. A partir de este modelo, se analizaron los consumos para los tres tipos de nodos definidos en el protocolo, observándose que los nodos *leaf* presentan el menor consumo promedio, mientras que los nodos intermedios registran valores ligeramente superiores debido al mantenimiento simultáneo de múltiples enlaces.

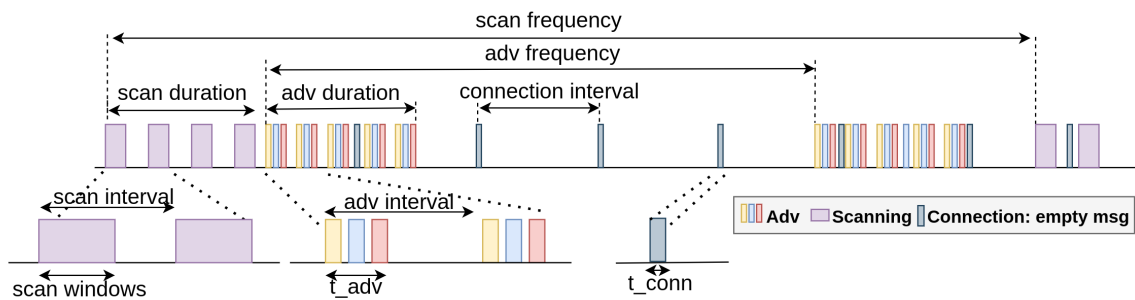


Figura 5.1: Distintos eventos de un nodo BLETree.

La Tabla 5.1 muestra el consumo promedio de corriente y la duración medida en laboratorio para los diferentes usos de la radio en el protocolo BLETree.

5.2. Caracterización del consumo BLETree

Tabla 5.1: Consumo para diferentes eventos en BLETree.

Evento ¹	Duración del evento (ms)	Corriente promedio ²
Sleep	$t_s = T - t_{active}$ ³	$I_s = 1.85 \mu A$
<i>Advertising</i>	$t_{adv} = 8.027$	$I_{adv} = 2.01 \text{ mA}$
Conexión ³	$t_{conn} = 3.917$	$I_{conn} = 1.63 \text{ mA}$
Ventana de escaneo	$t_{scann_w} = 34.5$	$I_{scann_w} = 9.4 \text{ mA}$

¹ Ver Fig. 5.1 para la nomenclatura.

² Datos medidos múltiples veces y promediados con el PPKII.

³ t_{active} : duración total de los eventos de comunicación (advertising, conexión, escaneo, etc) dentro del período de operación.

⁴ Paquete vacío.

Los siguientes parámetros fueron utilizados en los cálculos posteriores: intervalo de *advertising*, duración del *advertising* e intervalo de escaneo, con valores específicos de 100 ms, 1300 ms y 60 ms, respectivamente.

El intervalo de conexión, junto con el número de conexiones, tiene un impacto directo en el consumo de energía, como se muestra en la Figura 5.2. A mayor número de conexiones que un nodo establece, mayor será su consumo energético. Por este motivo, cuando un nodo desea unirse al árbol de la red y tiene dos posibles padres en el mismo nivel, se conectará con aquel que tenga menos conexiones activas. Esta estrategia permite lograr un consumo energético más equilibrado en toda la red. Un intervalo de conexión más largo reduce el consumo, aunque a costa de una mayor latencia.

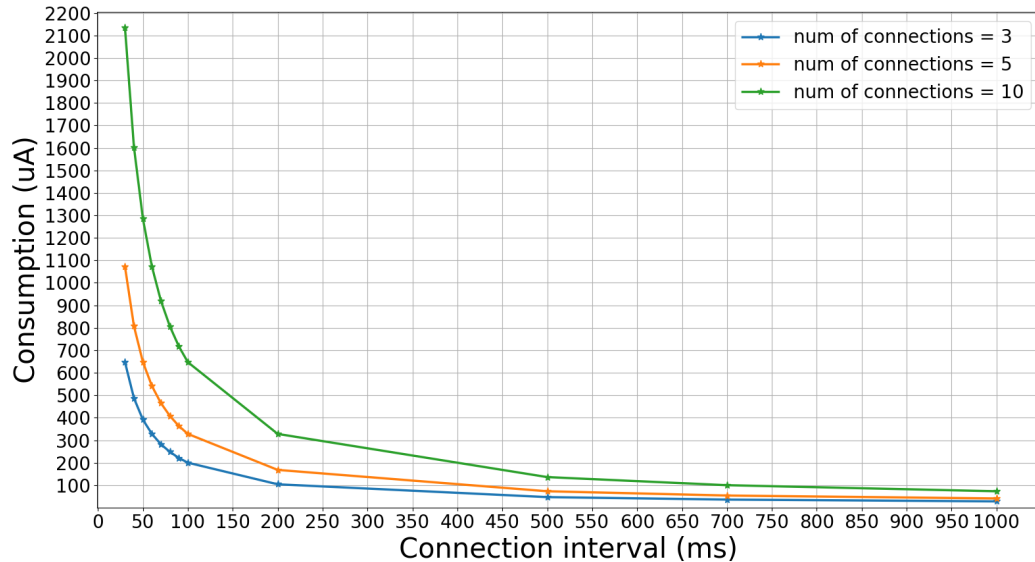


Figura 5.2: Consumo promedio para diferentes intervalos de conexión y número de conexiones en un nodo intermedio. Frecuencia de escaneo = 0, frecuencia de *advertising* = 30 s.

La Figura 5.3 muestra el consumo promedio de corriente de la red BLETree al

Capítulo 5. Resultados Experimentales

variar la frecuencia de actualización del escaneo de los nodos padre. La duración de escaneo debe ser mayor que la frecuencia de *advertising*, asegurando que el paquete publicitario sea capturado correctamente. Se seleccionó una duración de escaneo igual a dos veces la frecuencia de *advertising*. Para una frecuencia de actualización de 15 min y una duración de 60 s (con un intervalo de conexión de 700 ms, cinco conexiones y una frecuencia de *advertising* de 30 s), el consumo fue de 420 μA . Por otro lado, una frecuencia de actualización más lenta, por ejemplo, cada 1 h, redujo el consumo a 144 μA , y cada 3 h lo disminuyó aún más hasta 84 μA .

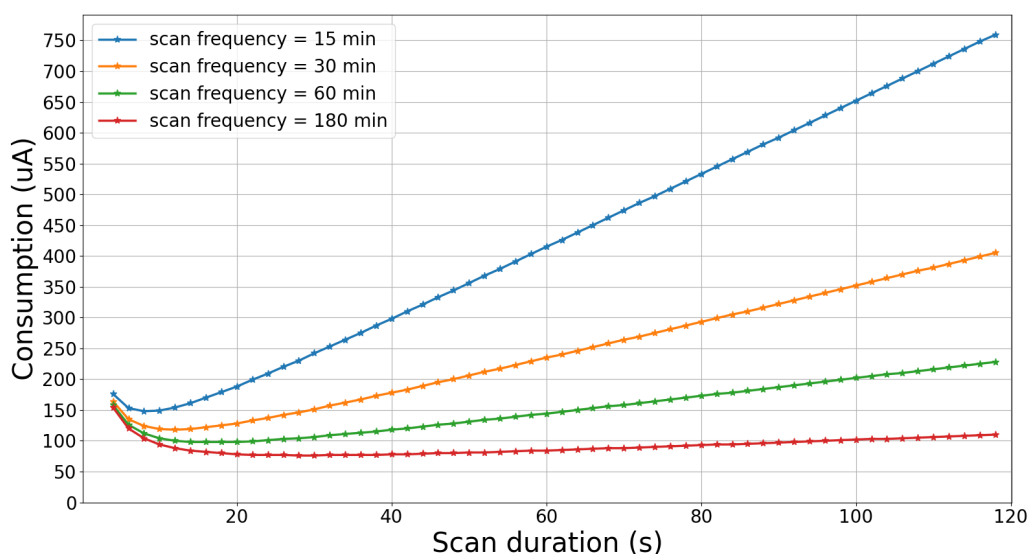


Figura 5.3: Consumo promedio para diferentes parámetros de actualización de padres en un nodo intermedio. Número de conexiones = 5, intervalo de conexión = 700 ms.

La Tabla 5.2 muestra el consumo promedio calculado para los diferentes roles de nodo. Los roles *root* y *leaf* no realizan actualizaciones de padres, por lo que su consumo es menor que el del nodo intermedio.

Tabla 5.2: Consumo promedio para diferentes roles en BLETree.

Rol	Tipo de nodo	Corriente promedio
<i>Root</i> ¹	Periférico	54 μA
Intermedio ²	Central/Periférico	84 μA
<i>Leaf</i> ³	Central	11 μA

¹ Intervalo de conexión 700 ms, 5 conexiones, frecuencia de *advertising* 30 s.

² Intervalo de conexión 700 ms, 5 conexiones, frecuencia de *advertising* 30 s, frecuencia de escaneo 180 min, duración de escaneo 60 s.

³ Intervalo de conexión 700 ms, 1 conexión.

Intervalo de conexión con transmisión de datos

El incremento de consumo atribuido a la transmisión de datos resulta despreciable cuando el intervalo de transmisión es significativamente mayor al intervalo de conexión. Para validar esta hipótesis y cuantificar su contribución, se realizó una prueba entre dos nodos (intervalo de conexión de 700 ms, frecuencia de *advertising* de 30 s). En esta prueba, un nodo envió 20 mensajes de 16 bytes cada uno cada 30 s (estos 20 mensajes simulan los datos almacenados de los nodos situados por debajo en la jerarquía de la red). El incremento adicional de consumo causado por esta carga de datos fue de solo $3.7 \mu\text{A}$.

5.3. Consumo energético

El consumo energético de los distintos protocolos se evaluó experimentalmente con el objetivo de analizar su comportamiento en redes inalámbricas de sensores alimentadas por baterías. Para todas las mediciones se utilizó un Power Profiler Kit II (PPKII), [36], que permitió obtener el consumo medio de corriente en condiciones controladas de laboratorio, considerando los diferentes estados de actividad de la radio y los parámetros de conexión configurados.

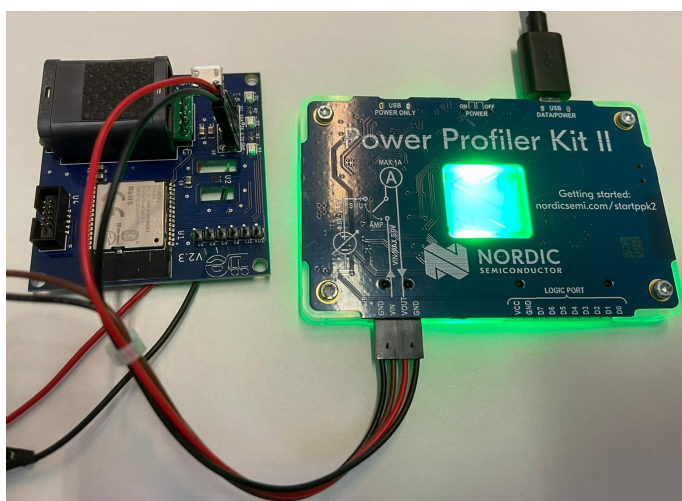


Figura 5.4: Medición del consumo del dispositivo de monitoreo de CO_2 utilizando el PPKII.

Las siguientes mediciones de todos los protocolos son utilizando el mismo hardware y enviando los mismos datos de aplicación (ID, CO_2 , temperatura y humedad) cada 30 segundos.

5.3.1. BLE

En el caso del protocolo BLE estándar, las mediciones muestran un consumo medio de corriente del orden de $11 \mu\text{A}$, considerando una potencia de transmisión de +0 dBm, un intervalo de conexión de 700 ms y ausencia de transmisión continua de datos.

Capítulo 5. Resultados Experimentales

5.3.2. BLE Mesh

En BLE Mesh, el consumo depende fuertemente del rol del nodo dentro de la red. Los nodos de bajo consumo (LPN) presentan valores promedios de 130 μA . En contraste, los nodos FN y *relay*, que deben mantener la radio permanentemente activa para reenviar mensajes, superan los 5 mA, lo que confirma que requiere alimentación eléctrica.

5.3.3. BLETree

El protocolo BLETree presenta menores niveles de consumo que el esquemas BLE Mesh pero mayor que BLE. En una red experimental de 10 nodos y 4 niveles, se obtuvieron los siguientes valores promedio

- Nodo *root* (rol periférico): 54 μA
- Nodos intermedios (rol central/periférico): 84 μA
- Nodo *leaf* (rol central): 11 μA

Incluso considerando actualizaciones de estructura cada 180 minutos, el consumo promedio se mantiene dos órdenes de magnitud menor que el de los nodos intermedios de BLE Mesh. Asimismo, la transmisión de datos periódica apenas incrementa el consumo en 3–4 μA , lo que evidencia la eficiencia del mecanismo de sincronización y la reducción de tiempo de radio activa.

El nodo *leaf* tiene un consumo igual al BLE ya que es idéntico, solo tiene la conexión con el padre.

5.4. Latencia y Escalabilidad

La latencia, directamente proporcional al producto del número de saltos por el intervalo de conexión, se mantuvo en un máximo teórico de 2.8 segundos en una red de 4 niveles con intervalos de 700 ms. En pruebas prácticas, la red mostró estabilidad y consistencia hasta 10 nodos, sin congestión ni degradación perceptible.

La latencia depende de la posición del nodo dentro de la jerarquía del árbol y del tiempo de los intervalos de conexión entre los nodos a lo largo de la ruta del mensaje. El ajuste de estos intervalos tiene un impacto significativo en la latencia: un intervalo de conexión más largo implica una comunicación menos frecuente entre dispositivos. Existe, por tanto, un compromiso entre latencia y consumo energético: al aumentar el intervalo de conexión, el consumo disminuye, pero el tiempo de espera para el intercambio de datos se incrementa, generando una mayor latencia. Si se requiere una menor latencia, el intervalo de conexión debe reducirse, lo que conlleva un aumento en el consumo de energía.

Como se muestra en la Figura 5.5, si no se producen retransmisiones, la latencia máxima puede aproximarse como el producto entre el intervalo de conexión y el número de saltos. Por ejemplo, con un intervalo de conexión de 700 ms y una

5.4. Latencia y Escalabilidad

profundidad de cuatro niveles, la latencia máxima alcanza aproximadamente los 2.8 s.

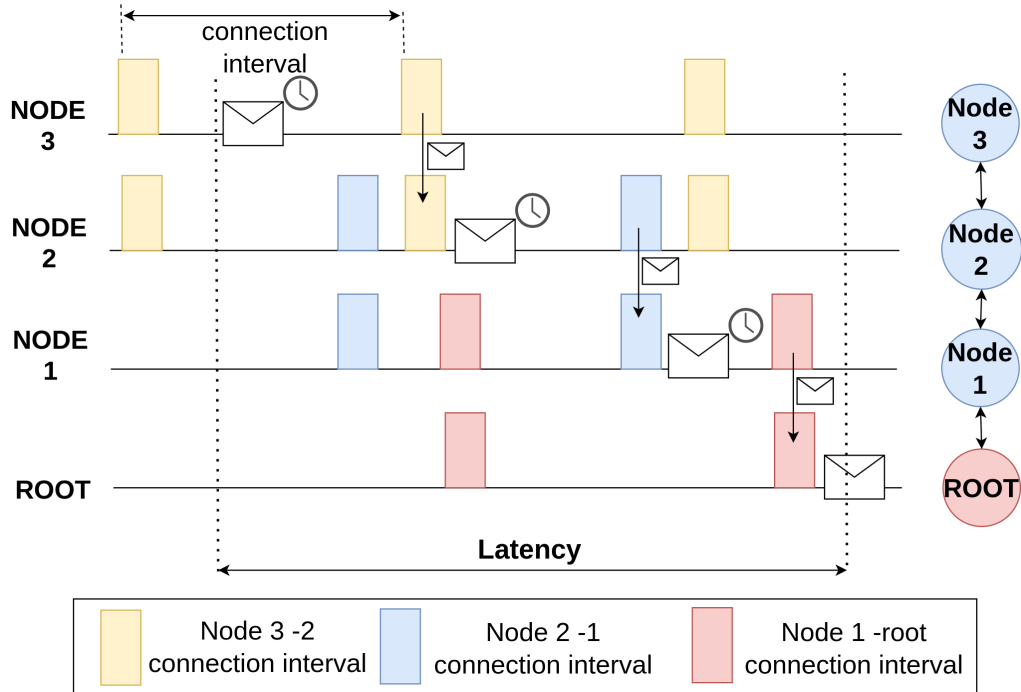


Figura 5.5: Latencia en el envío de un mensaje en función de la profundidad de la red.

5.5. Comparación de protocolos BLE, BLE Mesh y BLE-Tree

La Tabla 5.3 resume la comparación entre las diferentes tecnologías discutidas previamente. Ambas tecnologías son aplicadas al mismo hardware y envían la misma cantidad de datos con la misma frecuencia.

Tabla 5.3: Comparación de protocolos BLE, BLE Mesh y BLETree.

Característica	BLE	BLE Mesh	BLETree
Alcance	Corto (10–15 m por enlace).	Extendido: alcance BLE por el número de repetidores.	Extendido: alcance BLE por el número de saltos
Consumo energético	11 μA .	5 mA (Relay y FN) 120 μA LPN.	11 μA , 54 μA , 84 μA
Latencia	Depende del período de conexión (7.5 ms a cientos de ms).	Determinada por los múltiples saltos.	Determinada por la profundidad del árbol y el período de conexión.

5.6. Resultados de las redes instaladas en las escuelas

Se dispone de una extensa base de datos de CO₂, temperatura y humedad, recopilada de manera continua durante más de dos años en dos centros educativos. Esta información ha permitido al equipo de Mecánica de los Fluidos realizar diversos estudios sobre el comportamiento de dichas variables en ambientes escolares.

En la Figura 5.6 se presentan los niveles de CO₂ registrados en distintas salones de clase, mientras que la Figura 5.7 muestra la evolución temporal de la concentración de CO₂ a lo largo de varios días.

5.6. Resultados de las redes instaladas en las escuelas

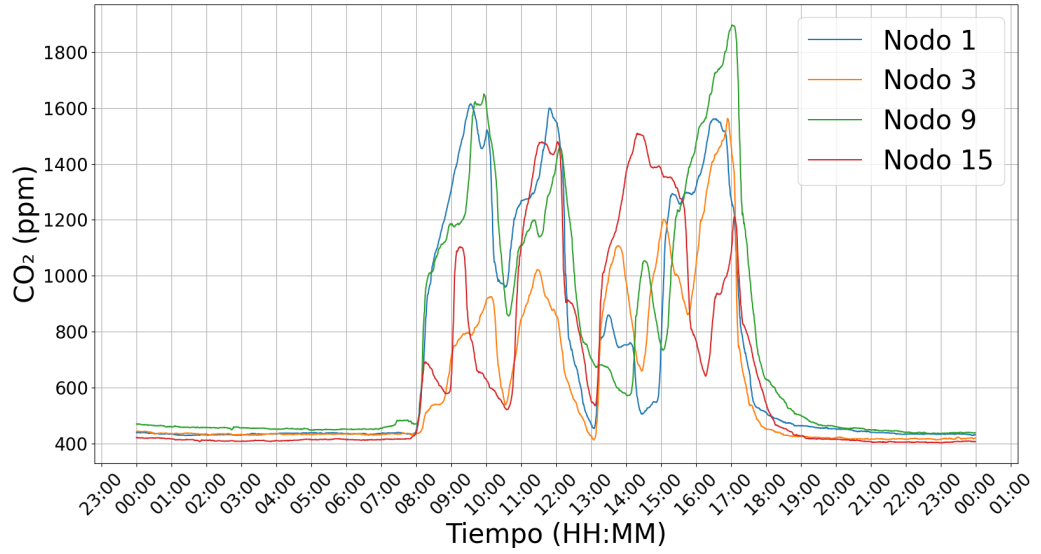


Figura 5.6: Niveles de CO₂ en diferentes salones.

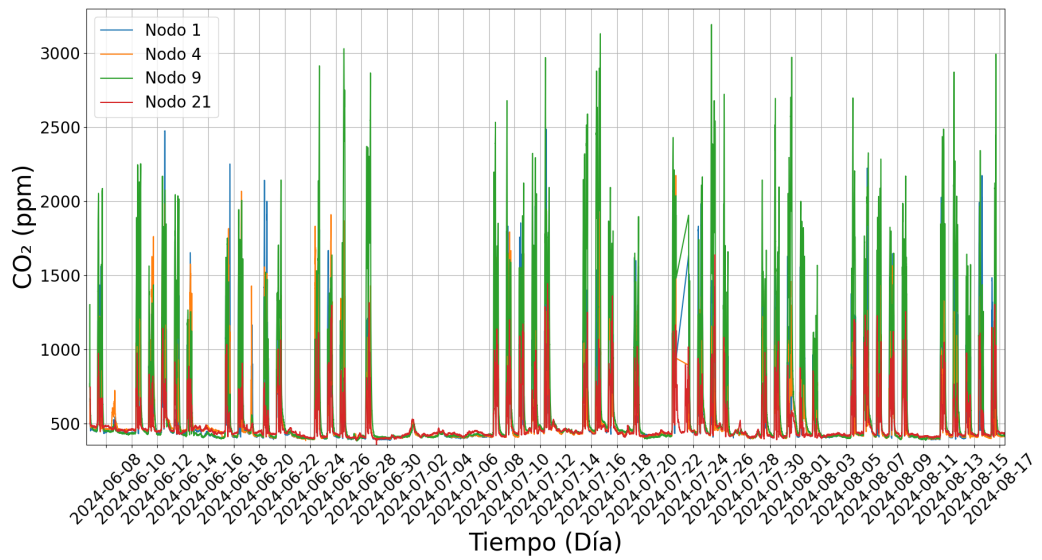


Figura 5.7: Niveles de CO₂ recolectados durante varios días

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 6

Conclusiones

Se fabricaron más de 65 equipos de medición, considerando las distintas versiones desarrolladas, los cuales fueron instalados en dos centros educativos para el monitoreo de la calidad del aire. La recolección continua de datos durante los últimos dos años ha permitido al equipo de mecánica de los Fluidos realizar un análisis detallado del comportamiento de las variables medidas.

A partir de estas experiencias, fue posible identificar tanto las ventajas como las limitaciones del uso de los protocolos BLE y BLE Mesh para la conformación de redes IoT. En este contexto, la implementación de un protocolo basado en BLE para una red en árbol multirol ha demostrado ser una solución viable y eficaz para aplicaciones que demandan bajo consumo energético y cobertura extendida. El desarrollo fue realizado sobre la plataforma nRF Connect SDK y Zephyr, permitiendo que el diseño sea adaptable a otras plataformas gracias a su modularidad.

Los resultados obtenidos confirman que la arquitectura propuesta supera ampliamente las limitaciones energéticas de BLE Mesh, cuyo consumo obliga a mantener nodos intermedios conectados a la red eléctrica. En contraste, la implementación de BLETree permite operar todos los nodos con alimentación a batería, prolongando la autonomía energética de los dispositivos y habilitando su despliegue en entornos donde el acceso a la red eléctrica es limitado o inexistente. Además, resulta una solución segura para el ámbito escolar, ya que ofrece total libertad en la ubicación de los dispositivos. A partir de la comparación energética entre BLE y BLE Mesh, se concluye que BLETree presenta un consumo superior al de BLE, aunque significativamente menor que el de los nodos *relay* y FN de BLE Mesh, ofreciendo así un equilibrio entre eficiencia energética y alcance de red.

Cabe señalar que, si bien la latencia observada aumenta con la profundidad de la red y la longitud de los intervalos de conexión, los valores registrados son aceptables para la mayoría de las aplicaciones previstas. Esto refuerza la idea de que el protocolo propuesto es ideal para monitoreo ambiental, sensores industriales o de edificios inteligentes, donde las exigencias de tiempo real son bajas.

Como líneas de trabajo futuro se proponen varias mejoras: la inclusión de nodos multiparentales, lo cual aumentaría la robustez de la red al permitir que un nodo reemplace rápidamente a su padre en caso de fallo; la optimización dinámica de

Capítulo 6. Conclusiones

los parámetros de conexión para adaptarse a las condiciones de tráfico y consumo; y la evaluación en redes de mayor tamaño y en escenarios de mayor interferencia, para confirmar la escalabilidad y robustez del sistema.

En resumen, el trabajo aquí presentado constituye un paso significativo hacia el diseño de redes inalámbricas de bajo consumo y cobertura extendida, demostrando que es posible aprovechar las ventajas energéticas de BLE y, al mismo tiempo, superar sus limitaciones inherentes mediante un diseño jerárquico y eficiente. A modo de resumen, se listan los aportes realizados en el marco de esta tesis:

- Se implementó un protocolo a partir de las características de BLE para extender la cobertura del mismo y simular una red BLE Mesh.
- Se caracterizó el consumo del nuevo protocolo, protocolo BLE y protocolo BLE Mesh.
- Los distintos sistemas fueron utilizados en una aplicación IoT real para medir el nivel de CO₂ en diferentes ambientes.
- El firmware es totalmente abierto para que otros lo usen y introducir mejoras.
- Los sistemas fueron utilizados por el equipo de Mecánica de los Fluidos que le permitieron realizar varios análisis y publicaciones.
- Se tiene una base de datos de niveles de CO₂ recopilados a lo largo de varios de años.

6.1. Publicaciones asociadas a la tesis

La siguiente publicación fue presentada en el congreso 2024 XIV Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC) y expone los resultados del protocolo BLETree:

- **L. Díaz**, L. Steinfeld, A. Seré y J. P. Oliver, “Low Power Tree Network Implementation Using Bluetooth Low Energy Multirole,” *2024 XIV Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC)*, Recife, Brasil, 2024, pp. 1–6, doi: 10.1109/SBESC65055.2024.10771913.

Los siguientes trabajos están directamente relacionados con esta tesis y abordan distintos aspectos del proyecto, como las instalaciones en la escuela, los resultados obtenidos y diversos análisis realizados:

- **L. Díaz**, J. Azziz, J. P. Oliver y F. Veirano, “Low-Power Wireless Sensor Network for Real-Time Indoor Air Quality Monitoring with CO₂ Sensors,” *2024 IEEE 15th Latin America Symposium on Circuits and Systems (LASCAS)*, Punta del Este, Uruguay, 2024, pp. 1–5, doi: 10.1109/LASCAS60203.2024.10506164.

6.2. Trabajo a futuro

- Red de sensores inalámbricos para medir concentración de CO₂ en escuelas, **Leandro Díaz**, Julián O’Flaherty, Juan Pedro Maestroni, Francisco Veirano, Juan P. Oliver Congreso interdisciplinario COVID 19, pandemia y post pandemia, 26-29 July 2022.
- Carbon Dioxide Measurements at Multiple Points in an Elementary School Classroom And Risk Estimation of Airborne Transmission: A Two-Month Field Campaign M. Mendina, J.P. Oliver, J. Azziz, **L. Díaz**, L. Pardo, M. Draper. WIAC2025 - 6th Workplace and Indoor Aerosols Conference, May 2025, Gaeta, Italy.
- Multidisciplinary Study of Air Quality in Schools: multiple approaches to a single problem. D. Arredondo, J. Azziz, M. Camacho, G. Capdehourat, M. D’Angelo, M. Draper, **L. Díaz**, J. Florez, I. Franchi, M.J. Gonzalez, L. Gutierrez, P. Gómez, M.N. López, J.P. Oliver, L. Pardo, L. Pereira, G. Pérez, L. Robino, P. Scavone, J. Villarreal. WIAC2025 - 6th Workplace and Indoor Aerosols Conference, May 2025, Gaeta, Italy.

La siguiente publicación se encuentra actualmente bajo revisión:

- Air Quality, Atmosphere & Health “Assessment of indoor air quality, thermal comfort, and airborne microbiology in school buildings in Uruguay: a transdisciplinary approach” Author names: Martín Draper, Paola Scavone, Mariana Mendina, Juan Pablo Oliver, Mauro D’Angelo, María Noel López, Daniela Arredondo, María José González, Jonathan Florez, Magdalena Camacho, Lucía Pereira, Germán Pérez, Luciana Robino, Ana Paula Gómez, **Leandro Díaz**, Julia Azziz, Germán Capdehourat, Lorena Pardo.

6.2. Trabajo a futuro

6.2.1. Consideraciones sobre la latencia en BLETree y propuesta de mejora

El protocolo BLETree, tal como fue diseñado en este trabajo, prioriza la eficiencia energética de los nodos integrados al árbol mediante el uso de intervalos de conexión amplios. Sin embargo, esta estrategia tiene un impacto directo sobre la latencia en el intercambio de mensajes. Dado que los nodos sólo pueden transmitir o recibir datos durante las ventanas definidas por el *connection interval* de BLE, el retardo en una transmisión punto a punto es, en el mejor de los casos, igual a la duración del intervalo de conexión. En el contexto de una topología en árbol, donde los mensajes pueden requerir múltiples saltos hasta alcanzar el nodo raíz, la latencia total crece proporcionalmente al producto entre el número de saltos y la duración del intervalo de conexión configurado.

De acuerdo a las especificaciones de BLE (versión 4.0 y posteriores), el intervalo mínimo de conexión permitido es de 7,5 ms por enlace. Por lo tanto, si todos los

Capítulo 6. Conclusiones

enlaces intermedios configuraran este valor mínimo, la latencia teórica mínima para un mensaje que recorra N saltos hasta el *root* sería:

$$L_{\text{mín}} = N \cdot 7,5 \text{ ms}$$

Por ejemplo, para un árbol con 4 saltos hasta el *root*, la latencia mínima alcanzable sería de aproximadamente 30 ms. No obstante, en la práctica, la mayoría de las implementaciones configuran valores superiores (entre 30 y 50 ms) para ahorrar energía, lo que eleva la latencia total a valores mayores (por ejemplo, 200 ms para cuatro saltos a 50 ms cada uno).

A fin de mejorar la latencia sin penalizar permanentemente el consumo energético, se propone un mecanismo basado en reserva dinámica de camino. Este mecanismo consiste en que, cuando un nodo desea transmitir un mensaje hacia el *root*, inicia un procedimiento de reserva de camino en el que solicita a sus ancestros que reduzcan temporalmente sus intervalos de conexión al mínimo permitido en BLE. Una vez que el mensaje alcanza el *root* y se confirma mediante un *acknowledgment*, los intervalos de conexión de la rama involucrada vuelven a su configuración original.

De este modo, se consigue una reducción significativa de la latencia durante la transmisión del mensaje crítico, mientras que la eficiencia energética se mantiene durante los períodos de inactividad.

6.2.2. Extensión de BLETree hacia una topología Mesh

Si bien el protocolo BLETree diseñado en este trabajo se basa en una estructura en árbol para organizar los nodos de la red, una posible mejora consiste en extenderlo para soportar una topología Mesh. Esta evolución permitiría que los nodos mantuvieran rutas alternativas hacia el nodo raíz, aumentando la robustez de la red y su tolerancia a fallos. En escenarios dinámicos, donde los nodos pueden desconectarse o moverse, una red puramente jerárquica puede volverse frágil, ya que la falla de un nodo intermedio puede desconectar a todos sus descendientes.

En una topología Mesh, los nodos mantienen múltiples enlaces con vecinos, no sólo con su padre en el árbol. De este modo, cuando un enlace falla, un nodo puede reconectarse a través de otra ruta hacia el *root*. Esta capacidad de reconexión inmediata contribuye a mejorar la disponibilidad de la red.

Sin embargo, la conversión de BLETree en una red Mesh presenta varios desafíos técnicos:

- Redes disjuntas: Al permitir múltiples enlaces y caminos alternativos, pueden formarse subconjuntos de nodos que forman redes parcialmente aisladas.
- Ciclos: A diferencia de un árbol, una malla puede contener ciclos. Es necesario implementar mecanismos de detección y eliminación de ciclos para evitar bucles de reenvío de mensajes.
- Coordinación: La sincronización entre nodos y la gestión de múltiples enlaces activos pueden aumentar el consumo energético.

Apéndice A

Desarrollo de las diferentes versiones de hardware

El proyecto comenzó con una primera versión, basada en una micro:bit V1, equipada con el SoC nRF51822. En esta etapa inicial, todos los componentes se utilizaron en sus respectivos módulos comerciales, interconectados mediante una protoboard genérica y cables, como se muestra en la figura A.1. Para las mediciones ambientales se utilizaron los siguientes módulos:

- Adafruit SHT4X (temperatura y humedad).
- Sensor Sunrise (CO₂).

Esta versión permitió validar rápidamente el funcionamiento básico del sistema y también fue usada para las primeras mediciones. Se desarrollaron al rededor de 20 equipos de esta versión.

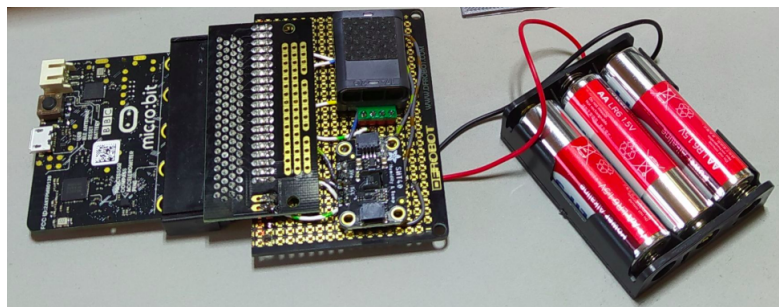


Figura A.1: Primer prototipo v1.2.

La segunda versión, figura A.2 se desarrolló con el objetivo de reemplazar la protoboard genérica y el cableado por un PCB que integrara y conectara de forma más robusta los distintos componentes. En esta etapa se mantuvieron los mismos sensores y el mismo microcontrolador, pero se mejoró la estabilidad mecánica y la velocidad de producción.

Apéndice A. Desarrollo de las diferentes versiones de hardware

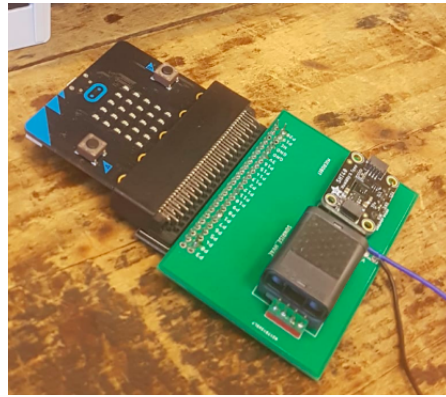


Figura A.2: Segundo prototipo v1.2.

La tercera versión se diseñó con un enfoque en la reducción del consumo y en la ampliación de las capacidades del sistema. La micro:bit presentó limitaciones importantes debido a sus 16 kB de RAM, lo que impedía seguir incorporando mejoras del firmware desarrollado en Zephyr. Con las nuevas versiones del sistema operativo, que corregían errores y añadían funcionalidades, ya no era posible compilar una imagen que se ajustara a los recursos de la micro:bit. Por este motivo, se decidió migrar a un microcontrolador nRF52840, utilizando el módulo Minew, cuya memoria RAM es significativamente mayor y permite ejecutar el firmware sin restricciones. Esta transición también hizo posible reducir de forma considerable el consumo energético, dado que la micro:bit incluye numerosos componentes adicionales cuyo consumo es elevado. Además, se reemplazó el módulo Adafruit SHT4X por el sensor SHT4X en su versión directa. Esta versión tuvo dos subversiones denominadas v2.2 y v2.3, figura A.3 y A.4, cuya diferencia radica en los LEDs y el puerto USB. De esta versión (v2.2 y v2.3) se fabricaron 65 dispositivos.

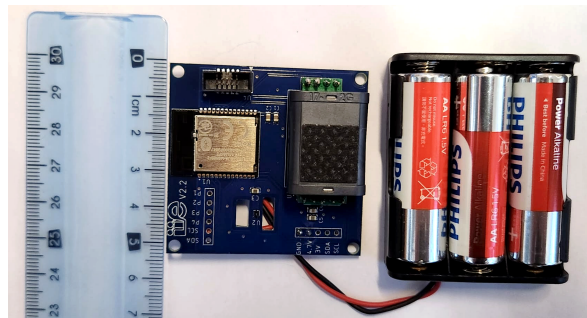


Figura A.3: Tercer prototipo v2.2.

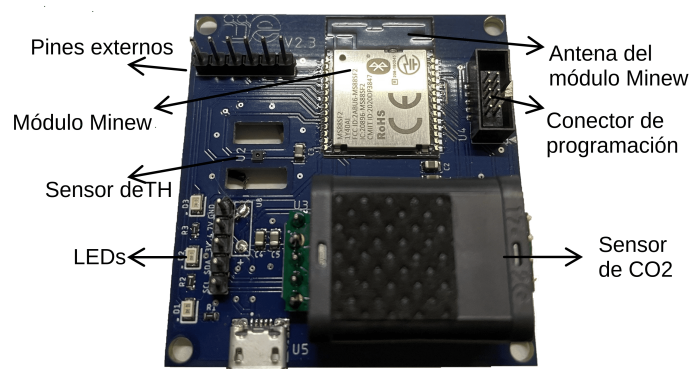


Figura A.4: Tercer prototipo v2.3.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Referencias

- [1] Imane Cheikh, Sébastien Roy, Essaid Sabir, and Rachid Aouami. Energy, scalability, data and security in massive iot: Current landscape and future directions. *arXiv preprint arXiv:2505.03036*, 2025.
- [2] Mahbubul Islam, Hossain Md. Mubashshir Jamil, Samiul Ahsan Pranto, Rupak Kumar Das, Al Amin, and Arshia Khan. Future industrial applications: Exploring lpwan-driven iot protocols. *Sensors*, 24(8), 2024.
- [3] Tomar, Ankur. Introduction to ZigBee Technology. Global Technology Centre, July 2011. Disponible en: <https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/DI367/%CE%A5%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8C/introduction-to-zigbee-technology.pdf>.
- [4] Minew Technologies. LoRaWAN Range Overview. Disponible en: <https://www.minew.com/es/lorawan-range-overview/>, 2024. Accedido: 2025-11-15.
- [5] Elkhodr, Mahmoud, Shahrestani, Seyed, and Cheung, Hon. Emerging Wireless Technologies in the Internet of Things: a Comparative Study. *arXiv*, arXiv:1611.00861, 2016. Disponible: 2025-11-15.
- [6] Nordic Semiconductor ASA. nRF51822 Product Specification. https://docs.nordicsemi.com/bundle/nRF51-Series/resource/nRF51822_PS_v3.4.pdf, 2015. Sección Radio current consumption. Último acceso: 5 de agosto de 2025.
- [7] Nordic Semiconductor ASA. nRF52840 Product Specification. https://docs-be.nordicsemi.com/bundle/ps_nrf52840/attach/nRF52840_PS_v1.11.pdf?_LANG=enus, 2024. Sección Radio current consumption. Último acceso: 5 de agosto de 2025.
- [8] Xenofon Fafoutis, Evgeny Tsimbalo, Wenrui Zhao, Haowen Chen, Evangelos Mellios, William Harwin, R.J. Piechocki, and I.J. Craddock. Ble or ieee 802.15.4: Which home iot communication solution is more energy-efficient? *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, 2, 05 2016.
- [9] Antonio Cilfone, Luca Davoli, Laura Belli, and Gianluigi Ferrari. Wireless mesh networking: An iot-oriented perspective survey on relevant technologies. *Future Internet*, 11(4), 2019.

Referencias

- [10] Carles Gomez, Joaquim Oller Bosch, and Josep Paradells. Overview and evaluation of bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 12:11734–53, 12 2012.
- [11] Jacopo Tosi, Fabrizio Taffoni, Marco Santacatterina, Roberto Sannino, and Domenico Formica. Performance evaluation of bluetooth low energy: A systematic review. *Sensors*, 17(12), 2017.
- [12] Mahmood A. Al-Shareeda, Murtaja Ali Saare, Selvakumar Manickam, and Shankar Karuppayah. Bluetooth low energy for internet of things: review, challenges, and open issues. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 31(2):1182 – 1189, 2023.
- [13] Bluetooth® Technology Website. Understanding Bluetooth Range. <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/key-attributes/range/>. Último acceso: 3 de junio de 2024.
- [14] Sheng-De Wang and Kuan-Jung Chiang. Ble tree networks for sensor devices in internet of things. In *2017 IEEE 15th Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, 15th Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, 3rd Intl Conf on Big Data Intelligence and Computing and Cyber Science and Technology Congress(DASC/PiCom/DataCom/CyberSciTech)*, pages 1304–1309, 2017.
- [15] Rasmus Thue Elkjær Dvinge, Adam Stalmach, and Lazaros Nalpantidis. Connection-based bluetooth mesh network as a low energy solution for off-grid data networks. In *2019 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST)*, pages 1–6, 2019.
- [16] Bishnu Kumar Maharjan, Ulf Witkowski, and Reza Zandian. Tree network based on bluetooth 4.0 for wireless sensor network applications. In *2014 6th European Embedded Design in Education and Research Conference (EDERC)*, pages 172–176, 2014.
- [17] Stanford Li, Yan Zhang, and Marie Hernes. Bluetooth low energy tree structure network. Application Report SWRA648, Texas Instruments, Dallas, TX, USA, 2019.
- [18] Mohammad Afaneh. *Intro to Bluetooth Low Energy: The Easiest Way to Learn BLE*. Independently Published, 2018. Copyright © 2018 Novel Bits, LLC.
- [19] U.S. Environmental Protection Agency. Introduction to Indoor Air Quality. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/introduction-indoor-air-quality>, 2024. Disponible: 03-jul-2024.
- [20] H Chojer, PTBS Branco, FG Martins, MCM Alvim-Ferraz, and SIV Sousa. Development of low-cost indoor air quality monitoring devices: Recent advancements. *Science of The Total Environment*, 727:138385, 2020.

- [21] Ansi/ashrae standard 62.1 – ventilation for acceptable indoor air quality, 2019. ANSI/ASHRAE Standard 62.1.
- [22] M.N. Schwarzberg. Carbon dioxide level as a migraine threshold factor: Hypothesis and possible solutions. *Medical Hypotheses*, 41(1):35–36, 1993.
- [23] St. Alvert Public Library. Carbon Dioxide (CO₂) Monitoring for Indoor Air Quality (IAQ). <https://www.sapl.ca/pdfs/co2-monitoring-for-indoor-air-quality-fact-sheet-2-pages.pdf>. Último acceso: 3 de julio de 2024.
- [24] OA Seppänen, WJ Fisk, and Mar J Mendell. Association of ventilation rates and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings. *Indoor air*, 9(4):226–252, 1999.
- [25] Scott D. Lowther, Sani Dimitroulopoulou, Kerry Foxall, Clive Shrubsole, Emily Cheek, Britta Gadeberg, and Ovnair Sepai. Low level carbon dioxide indoors—a pollution indicator or a pollutant? a health-based perspective. *Environments*, 8(11), 2021.
- [26] MINEWSEMI. MS88SF2 Datasheet v1.0.0. https://en.minewsemi.com/file/MS88SF2-nRF52840_Datasheet_K_EN.pdf. Último acceso: 20 de junio de 2024.
- [27] Telaire T6613 CO₂ Sensor Module Datasheet. [https://f.hubspotusercontent40.net/hubfs/9035299/Documents/AAS-920-448K-Telaire-6613-CO₂-Module-062319-web.pdf](https://f.hubspotusercontent40.net/hubfs/9035299/Documents/AAS-920-448K-Telaire-6613-CO2-Module-062319-web.pdf). Último acceso: 20 de junio de 2024.
- [28] Sensirion SCD30 Sensor Module Datasheet. [https://sensirion.com/media/documents/4EAF6AF8/61652C3C/Sensirion_CO₂_Sensors_SCD30_Datasheet.pdf](https://sensirion.com/media/documents/4EAF6AF8/61652C3C/Sensirion_CO2_Sensors_SCD30_Datasheet.pdf). Último acceso: 20 de junio de 2024.
- [29] Senseair Sunrise Datasheet. <https://rmtplusstoragesenseair.blob.core.windows.net/docs/Dev/publicerat/PSH12460.pdf>. Último acceso: 20 de junio de 2024.
- [30] Intelligent Infrared CO₂ Module (MH-Z19B) – User Manual. https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z19b-co2-ver1_0.pdf. Último acceso: 20 de junio de 2024.
- [31] CO₂Meter, Inc. How Does an NDIR CO₂ Sensor Work? <https://www.co2meter.com/blogs/news/how-does-an-ndir-co2-sensor-work>, 2025. Accedido: 2025-11-15.
- [32] SHT4x Sensor Datasheet. https://sensirion.com/media/documents/33FD6951/662A593A/HT_DS_Datasheet_SHT4x.pdf. Último acceso: 22 de junio de 2024.

Referencias

- [33] The Linux Foundation. Zephyr RTOS. <https://zephyrproject.org>, 2025. Último acceso: 2025-11-1.
- [34] Casey O’Grady. Bluetooth low energy multi-role demystified, November 2016. Accessed: 2025-10-03.
- [35] Roger Alexander, Anders Brandt, JP Vasseur, Jonathan Hui, Kris Pister, Pascal Thubert, P Levis, Rene Struik, Richard Kelsey, and Tim Winter. RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks. RFC 6550, March 2012.
- [36] Power Profiler Kit II (PPK2). <https://www.nordicsemi.com/Products/Development-hardware/Power-Profiler-Kit-2>. Último acceso: 5 de octubre de 2025.

Índice de tablas

1.1. Comparación de protocolos inalámbricos IoT.	1
3.1. Niveles de CO ₂	14
3.2. Comparación de sensores de CO ₂	16
3.3. Rango de tensión de operación de cada componente.	17
3.4. Costo de los principales componentes.	19
4.1. Características principales del servicio BLETree.	40
4.2. Características principales del servicio UART sobre BLE.	40
5.1. Consumo para diferentes eventos en BLETree.	45
5.2. Consumo promedio para diferentes roles en BLETree.	46
5.3. Comparación de protocolos BLE, BLE Mesh y BLETree.	50

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Índice de figuras

2.1. Canales usados en BLE. Imagen extraída de [18].	7
2.2. Proceso de conexión de dos dispositivos BLE. Imagen extraída de [18].	8
2.3. Proceso de conexión de dos dispositivos BLE. Imagen extraída de [18].	9
2.4. Diferentes tipos de nodo dentro de una red BLE Mesh.	11
3.1. Sistema general para la medición de calidad del aire.	15
3.2. Alimentación de los sensores.	17
3.3. Esquemático del hardware utilizado.	18
3.4. Diseño del dispositivo utilizado.	19
3.5. Diagrama de flujo de las diferentes tareas de la aplicación.	21
3.6. Diagrama de clases con sus atributos y métodos.	22
3.7. Distribución de carpetas para el almacenamiento de datos.	23
3.8. Página de inicio.	24
3.9. Página para visualizar el historial de datos de un salón.	25
3.10. Tablet para monitorear la calidad del aire.	26
3.11. Sistema de medición BLE.	26
3.12. Distribución de la red BLE en un salón.	27
3.13. Sistema de medición BLE Mesh.	27
3.14. Distribución de la WSN BLE Mesh en el primer piso.	28
3.15. Distribución de la WSN BLE Mesh en el segundo piso.	29
3.16. Arquitectura de doble WSN para resolver el problema de alcance.	29
4.1. Conceptos de multilink y multirole. C = central, P = periférico.	32
4.2. Multirole y Multilink para extender topología de la red BLE.	32
4.3. Diferentes topologías con los conceptos de multilink y multirole.	32
4.4. Ejemplo de topología en árbol de 3 niveles.	33
4.5. Diferentes tipos de nodos en BLETree.	35
4.6. Caso en el que un nodo unido al árbol envía mensajes para buscar nodos hijos.	35
4.7. Caso en el que un nodo unido al árbol espera recibir mensajes para encontrar nodos hijos.	36
4.8. Diagrama de estados para la búsqueda del nodo padre.	37
4.9. Diagrama de estados para la búsqueda del nodos hijos.	38
4.10. Diagrama de secuencia para la integración de un nodo al árbol.	39
4.11. Diagrama de capas del firmware BLETree.	41

Índice de figuras

5.1. Distintos eventos de un nodo BLETree.	44
5.2. Consumo promedio para diferentes intervalos de conexión y número de conexiones en un nodo intermedio. Frecuencia de escaneo = 0, frecuencia de <i>advertising</i> = 30 s.	45
5.3. Consumo promedio para diferentes parámetros de actualización de padres en un nodo intermedio. Número de conexiones = 5, intervalo de conexión = 700 ms.	46
5.4. Medición del consumo del dispositivo de monitoreo de CO ₂ utilizando el PPKII.	47
5.5. Latencia en el envío de un mensaje en función de la profundidad de la red.	49
5.6. Niveles de CO ₂ en diferentes salones.	51
5.7. Niveles de CO ₂ recolectados durante varios días	51
A.1. Primer prototipo v1.2.	57
A.2. Segundo prototipo v1.2.	58
A.3. Tercer prototipo v2.2.	58
A.4. Tercer prototipo v2.3.	59

Esta es la última página.
Compilado el martes 10 marzo, 2026.
<http://iie.fing.edu.uy/>