

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**RED DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA EL
MONITOREO DE CONDICIONES AMBIENTALES EN
OBJETOS DEL PATRIMONIO CULTURAL PERUANO**

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico

AUTOR:

Adrián Tomás Hinostroza Mendoza 

ASESOR

Jimmy Tarrillo 

Lima - Perú

Octubre 2022

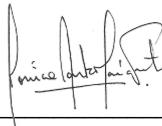
ANEXO 1

DECLARACIÓN JURADA

Yo, Mónica Cecilia Santa María Fuster, identificada con DNI No 18226712, en mi condición de autoridad responsable de validar la autenticidad de los trabajos de investigación y tesis de la UNIVERSIDAD DE INGENIERIA Y TECNOLOGIA, DECLARO BAJO JURAMENTO:

Que la tesis “Red de sensores inalámbricos para el monitoreo de condiciones ambientales en objetos del patrimonio cultural peruano”, que ha sido elaborada por Adrian Tomás Hinostraza Mendoza y que presenta para obtener el título profesional de Ingeniero Electrónico, ha sido sometida a los mecanismos de control y sanciones anti plagio previstos en la normativa interna de la universidad.

En fe de lo cual firmo la presente.



Dra Mónica Santa María Fuster
Directora de Investigación

En Barranco, el 8 de setiembre del 2022

Dedicatoria:

A mis padres: Cesar y María.

Agradecimientos:

Gracias a la familia Watmough por el constante apoyo desde el inicio de mi carrera. Este trabajo de investigación ha sido posible gracias al apoyo de Concytec, a través de ProCiencia y el apoyo del Banco Mundial (Convenio 035-2019-2019-FONDECYT-BM).

Índice general

	Pág.
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 Problemática	3
1.2 Objetivos	7
1.3 Alcances y limitaciones	7
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES	9
CAPÍTULO 3 MARCO TEÓRICO	13
3.1 Red de sensores inalámbricos	13
3.2 Internet de las cosas	14
3.3 Estándar IEEE 802.15	14
3.4 Tecnologías de comunicación inalámbrica	15
3.4.1 Zigbee	15
3.4.2 Bluetooth y Bluetooth Low-Energy	16
3.4.3 Wi-Fi	16
3.4.4 Red de datos móviles	17
CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA	18
4.1 Desarrollo del hardware del sistema	18

4.1.1 Hardware modular	20
4.1.2 Estrategias para una larga autonomía	23
4.1.3 Estrategias para un volumen reducido	23
4.2 Redes inalámbricas	24
4.2.1 Red inalámbrica entre nodo y gateway	25
4.2.2 Red inalámbrica entre gateway y plataforma online	26
4.3 Desarrollo del software del sistema	27
4.3.1 Plataforma online	27
4.3.2 Firmware del microcontrolador	29
4.4 Proceso de validación	31
4.4.1 Validación del hardware	31
4.4.2 Validación de las redes inalámbricas	33
4.4.3 Validación del software	33
CAPÍTULO 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
5.1 Implementación del hardware	35
5.1.1 Volumen alcanzado	36
5.1.2 Autonomía energética	37
5.2 Implementación de las redes inalámbricas	40
5.2.1 Implementación de la red Bluetooth <i>Low-Energy</i>	41
5.2.2 Implementación de las redes wifi y GPRS	41
5.3 Implementación del software	43
CONCLUSIONES	50
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
ANEXOS	58

Índice de tablas

3.1	Comparación entre estándares Wi-Fi	17
4.1	Lista de sensores seleccionados	22
5.1	Consumo de corriente correspondiente a cada estado en Nodo N2.	39
5.2	Consumo de corriente correspondiente a cada estado en Nodo N1.	40
5.3	Tiempos de vida del sistema para diferentes intervalos de envío.	40
5.4	Latencia máxima y mínima en el uso de las diferentes redes inalámbricas implementadas.	43
5.5	Alcance de la EEPROM para el guardado de datos en nodos.	46
5.6	Alcance de la EEPROM para el guardado de datos en el gateway.	46
5.7	Comparación entre las soluciones comerciales y el sistema desarrollado en este trabajo.	49

Índice de figuras

1.1	Ejemplos de dispositivos de monitoreo de almacenamiento local.	5
1.2	Ejemplos de dispositivos de monitoreo de almacenamiento remoto.	6
4.1	Diagrama de bloques general del sistema.	19
4.2	Diagrama de bloques del hardware modular.	21
4.3	Funcionalidad UART transparente en BLE.	25
4.4	Funcionalidad Provisión HTTP del módulo Wi-Fi.	27
4.5	Variables de configuración y campo dentro de Ubidots.	29
4.6	Trama de la URL direccionada con el método GET HTTP.	29
4.7	Flujo de intercambio de información entre nodos (ND), gateway (GW) y plataforma online (SERVER).	30
4.8	Medición de corriente de un nodo con el multímetro Fluke 289.	32
4.9	Esquema del hardware para las pruebas de validación de las redes inalámbricas.	34
5.1	Dispositivos implementados a nivel de hardware del sistema.	36
5.2	Nodo N1 situado entre las cerámicas del depósito del Museo de Pachacamac.	37
5.3	Gráfico de corriente del nodo N2 en mA DC vs. hora.	38
5.4	Nodo N1 colocado a un nivel alto para una conexión exitosa.	42
5.5	Historial de datos de temperatura del nodo N2 en Ubidots.	44
5.6	Historial de datos de temperatura del nodo N2 obtenido de la EEPROM.	45
5.7	<i>Dashboard</i> de configuración	47
5.8	<i>Dashboard</i> de campo	48

RESUMEN

Los objetos del patrimonio cultural peruano representan historia e identidad única para nuestra nación. Estos objetos son sensibles a las condiciones ambientales inadecuadas, por lo que su cuidado y conservación son tareas importantes. Generalmente se encuentran distribuidos en espacios que no posibilitan ni facilitan el uso de dispositivos comerciales de medición ambiental, por lo que no se tiene disponibilidad oportuna de las condiciones ambientales a las que se encuentran.

Es por eso que este trabajo presenta el diseño e implementación de una red de sensores que permiten su utilización en los diferentes espacios donde se encuentren los objetos del patrimonio cultural peruano. La propuesta considera requerimientos de larga autonomía, volumen reducido, amplio set de sensores y conectividad a internet sin depender de la infraestructura física y tecnológica del lugar.

Este sistema, compuesto por tres dispositivos, cuenta con conectividad wifi, GPRS y Bluetooth Low-Energy (BLE). Su desarrollo resultó en un volumen máximo de 119.81 cm³ y una autonomía de 8 meses a un tiempo de muestreo de 30 minutos. Además, el diseño de un sistema robusto y modular permitió su continuo funcionamiento aun con fallas en las comunicaciones inalámbricas y dio al usuario final una herramienta eficiente que simplifica su trabajo de conservación y cuidado de los objetos del patrimonio.

Palabras clave:

Patrimonio; sensores; monitoreo; IoT; WSN; internet; BLE; Wi-Fi; GPRS

ABSTRACT

WIRELESS SENSORS NETWORK FOR ENVIRONMENTAL CONDITIONS MONITORING IN PERUVIAN CULTURAL HERITAGE OBJECTS

The objects of the Peruvian cultural heritage represent history and unique identity for our nation. These objects are sensitive to inappropriate environmental conditions so their care and conservation are important tasks. They are distributed in places that do not allow or facilitate the use of commercial environmental measurement devices, so there is no timely availability of the environmental conditions in which they are located.

For these reasons, this work presents the design and implementation of a wireless sensor network where its nodes can operate in different places where the objects of Peruvian cultural heritage are located. The proposal considers requirements for long energy, reduced size, a wide set of sensors and internet connectivity without depending on the physical and technological infrastructure of the observed place.

This system, made up of three devices, has Wi-Fi, GPRS and Bluetooth Low-Energy (BLE) connectivity. Its development resulted in a maximum volume of 119.81 cm³ and an autonomy of 8 months at a sampling rate of 30 minutes. In addition, the design of a robust and modular system allowed its continuous operation even with failures in wireless communications and give an efficient tool that simplifies the conservation work to the users.

Keywords:

Heritage; sensors; monitoring; IoT; WSN; Internet; BLE; Wi-Fi; GPRS

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Este capítulo tiene por objetivo ser un preámbulo a este trabajo de tesis. En la primera sección se describirá la problemática a resolver y los requerimientos base para el desarrollo de este trabajo. La segunda sección presentará el objetivo general así como los objetivos específicos. Finalmente, en la tercera sección, se detallará los alcances y limitaciones de la propuesta de solución planteada.

1.1 Problemática

El patrimonio cultural constituye elementos materiales, manifestaciones inmateriales, riqueza y herencia de nuestra nación; útiles para el estudio, conocimiento y permanencia de nuestra historia [1]. Por esta razón, su cuidado, conservación y restauración son labores importantes que permiten su permanencia en un estado óptimo con el fin de ser conocidos y aprovechados por todas las generaciones, presentes y futuras.

Según el Centro Internacional de Estudios para la Conservación y la Restauración de los Bienes Culturales (ICCROM), los objetos del patrimonio cultural se ven perjudicados por diez agentes de deterioro que son: las fuerzas físicas, disociación, delincuencia, fuego, agua, plagas, contaminantes en el aire, luz, radiación ultravioleta (UV), temperatura y humedad relativa inadecuada [2]. De estos, son los agentes ambientales los de mayor impacto ya que tienen un efecto negativo, permanente, acumulativo e irreversible para estos objetos [3]. Por esta razón, el monitoreo ambiental es fundamental para la toma de decisiones dentro de una gestión de riesgos y conservación preventiva de estos bienes.

Esto permite realizar acciones adecuadas y oportunas ante cualquier evento ambiental desfavorable y permite mantener estos objetos a una condición ambiental óptima.

En el Perú y alrededor del mundo, los dispositivos utilizados para el monitoreo ambiental del patrimonio son soluciones comerciales que se presentan en dos formatos con respecto al tipo de almacenamiento: local y remoto [4]. Los dispositivos de monitoreo de almacenamiento local (ver ejemplos en la Figura 1.1) son los más usados por su reducido volumen y larga autonomía. Sin embargo, su uso requiere la visualización en el lugar o la descarga manual de los datos, en otras palabras, la presencialidad al usar estos dispositivos es indispensable para obtener información. En contraste, los dispositivos de monitoreo de almacenamiento remoto (ver ejemplos en la Figura 1.2) tienen la ventaja de disponibilizar datos en la nube, haciéndolos accesibles desde cualquier momento y lugar; sin embargo, dependen del nivel de la infraestructura tecnológica donde se encuentre el patrimonio, pues requieren de conectividad wifi o Ethernet, cableado para alimentación o una instalación especial por ser de mayor volumen. Asimismo, al igual que los dispositivos de monitoreo de almacenamiento local, estos cuentan con diferentes modelos y versiones que dependen del parámetro ambiental que se desee monitorear, por lo que no es posible monitorear varios parámetros ambientales con un solo dispositivo y de esta forma, no aumentar el volumen y el costo de mantenimiento.

Los objetos del patrimonio cultural del Perú, uno de los más vastos y diversos del mundo, se encuentran distribuidos a lo largo del territorio peruano en museos, iglesias, catedrales, centros de conservación, bibliotecas, almacenes y depósitos [8]. Debido a esto, el uso e instalación de dispositivos de monitoreo ambiental implica que se cumplan ciertos requerimientos para ser utilizados adecuadamente. Algunos de estos requerimientos o inconvenientes son los siguientes:

- Muchos de estos espacios tienen una infraestructura que dificulta la instalación de equipos de monitoreo que necesiten de un cableado eléctrico o que sean de baja



Tinytag View 2

HOBO MX1104

LASCAR EL-USB-2

FIGURA 1.1: Ejemplos de dispositivos de monitoreo de almacenamiento local. Estos dispositivos son utilizados en museos y centros de conservación. Tienen en común su pequeño tamaño, larga autonomía y amplia memoria de almacenamiento. Una descripción y comparación de estos dispositivos con el sistema desarrollado en este trabajo, se verá en las conclusiones de esta tesis. Recuperado de [5], [6] y [7].

autonomía; pues se necesitaría de mano de obra constante para poder darle el mantenimiento respectivo.

- Otro inconveniente radica en el volumen de estos dispositivos, pues afectarían visualmente la exposición de los objetos culturales (en museos, por ejemplo) si es que tienen un tamaño grande.
- La poca cantidad de personal capacitado también es una limitante, pues la conservación del patrimonio requiere de un alto conocimiento técnico tanto en temas de restauración como en el uso de herramientas para el monitoreo ambiental. Por esta razón, el uso de dispositivos simples de manejar e interpretar es requerido.
- La ubicación geográfica de los espacios donde se encuentra el patrimonio, puede ser a veces un impedimento para que investigadores puedan hacer un monitoreo continuo, es decir, la presencialidad de investigadores o conservadores no debe ser determinante para poder monitorear constantemente el patrimonio. Este último podría solucionarse con dispositivos de almacenamiento remoto a través de wifi. Sin embargo, la situación real es que este tipo de tecnología es escasa o deficiente en espacios no especializados en temas de conservación del patrimonio.



FIGURA 1.2: Ejemplos de dispositivos de monitoreo de almacenamiento remoto. Estos dispositivos tienen en común su capacidad de conexión a internet a través de WiFi o redes cableadas. Una descripción y comparación de estos dispositivos con el sistema desarrollado en este trabajo, se verá en las conclusiones de esta tesis. Recuperado de [9], [10] y [11].

- La gran diversidad del patrimonio implica la necesidad de utilizar diferentes sensores que permitan medir diferentes parámetros ambientales más relevantes para cada tipo de material de los objetos del patrimonio.

Las proposiciones que explican el contexto en el que se encuentra y desarrolla la labor de conservación de los objetos del patrimonio cultural peruano, están basadas en [8, 12] y dan un entendimiento claro de que las soluciones comerciales actuales no llegan a satisfacer los requerimientos para su uso e implementación adecuados en los espacios donde los objetos están ubicados. Por tal motivo, la propuesta de esta tesis se basa en los requerimientos básicos que deben tener los dispositivos de monitoreo en el contexto peruano de la conservación del patrimonio. Estos son:

- Volumen reducido no mayor a 150 cm^3 basado en un promedio de los volúmenes de las soluciones comerciales.

- Larga autonomía energética mínima de 6 meses basado en un tiempo de muestreo adecuado de 30 minutos.
- Accesibilidad remota de datos sin una dependencia total de una cobertura wifi
- Capacidad de contener un amplio set de sensores que permitan medir los parámetros ambientales de mayor impacto como: la temperatura, humedad relativa (HR), luz, radiación UV y contaminantes en el aire en forma de partículas.

1.2 Objetivos

El objetivo general de esta tesis es diseñar e implementar una red de sensores inalámbricos para el monitoreo remoto de las condiciones ambientales de objetos del patrimonio cultural adecuado al contexto de su conservación en el Perú. En este sentido, se plantean los siguientes tres objetivos específicos:

1. Seleccionar los componentes electrónicos que constituyen el sistema tangible con los criterios de optimización de eficiencia energética y funcional.
2. Diseñar e implementar una red de sensores inalámbricos bajo criterios de optimización de volumen, larga autonomía y envío de datos hacia internet.
3. Diseñar e implementar un *dashboard* para la presentación y accesibilidad de datos en la nube.

1.3 Alcances y limitaciones

El sistema propuesto se desarrolló a nivel de prototipo implicando la validación de funcionamiento y diseño que permite su simple uso e instalación en espacios donde

se encuentren objetos de patrimonio cultural. Este cuenta con tres dispositivos que pertenecen a la red de sensores inalámbricos propuesto: dos nodos y un gateway. Los nodos miden los parámetros ambientales y el gateway recibe los datos de los nodos y los enviará a internet de forma inalámbrica.

Los nodos pueden medir temperatura, humedad relativa, luz ambiental, radiación UV y material particulado PM2.5 y PM10; y envían estos datos al gateway de forma inalámbrica. Por otro lado, el gateway envía los datos de los nodos a internet, considerando el uso de wifi y red de datos móviles 2G como respaldo. Además, la red inalámbrica entre nodos y gateway está basada en el estándar para las comunicaciones inalámbricas de área personal IEEE 802.15.

Si bien los sensores seleccionados cumplen con requisitos de pre-calibración de fábrica, en este trabajo no se realizó una calibración posterior de los sensores dada la complejidad y la necesidad de equipos especializados que este tema demanda. Finalmente, el sistema propuesto debe realizar el monitoreo ambiental a los objetos del patrimonio cultural ubicado en interiores.

Capítulo 2

ANTECEDENTES

Este capítulo presenta trabajos de investigación correspondientes con el monitoreo de colecciones o del patrimonio cultural material. En la literatura se pueden encontrar sistemas de monitoreo de condiciones ambientales, sistemas de alerta contra robo de colecciones y sistemas de provisión de información a los visitantes. Cada investigación ha sido diseñada con una red de sensores específica, con almacenamiento local, almacenamiento remoto, diferente cantidad de sensores y con el uso de diferentes tecnologías de comunicación inalámbrica.

En el trabajo realizado en [13], los autores desarrollaron un sistema de medición remota de material particulado para el cuidado de colecciones en museos. Los sensores envían directamente los datos medidos a un servidor EC2 AWS a través de wifi bajo el protocolo UDP. Mientras que en esta investigación los autores no contemplan el diseño de una red de sensores inalámbricos (WSN, del inglés *Wireless Sensor Network*), en [14] los autores presentan el diseño de actuadores y una WSN con sensores de temperatura, humedad, luz, aceleración y presencia. Además, un gateway basado en un Raspberry-Pi 3 Modelo B, establece la conexión entre los nodos y el servidor a través de wifi bajo el protocolo MQTT que, según los autores, ofrece una mejor eficiencia en aplicaciones IoT de tiempo real. Los resultados de esta implementación muestran que el tiempo de vida es de aproximadamente 9.8 días con el uso de tres baterías LiFePO4 de 600 mAh a 3.2 V. Adicionalmente, en [15] los autores desarrollaron un sistema de las mismas características que en [14]; sin embargo, consideraron el respaldo de la red celular LTE (del inglés, Long Term Evolution) cuando wifi no está disponible.

Mientras que en las investigaciones mencionadas anteriormente se utilizaban un servidor online, en los trabajos desarrollados en [16, 17] se presenta el uso de un almacenamiento local conectando la estación base a una computadora a través de USB. En ambas investigaciones se descarta el uso de wifi en todo el sistema. En [16], los nodos sensores se comunican con un gateway bajo la banda libre de 2.4GHz (usando el módulo nRF24L01 de Nordic) a través de un método de saltos personalizado usado como topología de red. Se presenta el uso de sensores de temperatura, humedad y luz; y la visualización de datos se da a través de una interfaz de usuario basada en LabVIEW. Similarmente, en [17] se usa la tecnología zigbee en la banda de 2.4 GHz y el nodo central se conecta directamente a una computadora para la visualización de datos de forma local. Los resultados en [16] muestran que el sistema tiene un tiempo de vida no mayor a 20 horas utilizando una batería de 1200 mAh y basado en una medición en tiempo real. Además, en [17] los autores obtuvieron un tiempo de vida de dos meses con dos baterías de tipo AA basado en un tiempo de muestreo de 10 minutos.

En los trabajos como [18, 19] se usa Zigbee como tecnología de comunicación entre los nodos y el gateway. Para los nodos se utilizó un microcontrolador CC2650 de Texas Instruments que consta de un chipset para la comunicación por el estándar de Zigbee. En ambos, el gateway se basa en un Raspberry-Pi 3 Model B que se conecta a un servidor para la visualización de los datos (como en [14]). Los resultados en [18] muestran que el tiempo de vida del sistema es de 50.08 días; sin embargo, en [19] los autores presentan un método llamado “Energy Harvesting” que consiste en alimentar a los nodos de forma inalámbrica. Esto hace que no se requiera de baterías por lo que el tiempo de vida depende únicamente de si el método “Energy Harvesting” está trabajando.

Dentro del diseño de WSNs complejas donde se encuentran los nodos de anclaje como intermediarios entre la estación base y los nodos sensores, en [20, 21] se desarrolla un sistema para el monitoreo de temperatura, humedad y luz dentro de un museo. Mientras que en [20] los nodos sensores están basados en el SoC CC2430 de Chipcon

diseñado para aplicaciones bajo el estándar IEEE 802.15.4, en [21] se utilizó la banda ISM de 686MHz que, según los autores, ofrece una mejor propagación y penetración de obstáculos comparado con la banda de 2.4 GHz. El uso del estándar IEEE 802.15.4 en [20] permitió a los autores aplicar dos topologías en el sistema: estrella para los nodos sensores y de agregación; y multisalto para los nodos de agregación y la estación base. En ambas investigaciones, los datos recibidos por la estación base son usados para graficar diferentes tablas de forma local en una computadora, esto es posible ya que las estaciones base está conectada directamente a través de USB. Los resultados en [21] muestran un tiempo de vida de 13 a 15 meses con baterías AA basándose en un intervalo de medición de 10 minutos.

En el contexto del desarrollo de sistemas de monitoreo para la detección de robos de las colecciones dentro de museos, en [22, 23] se presenta un sistema de monitoreo para la detección de eventos de vandalismo sobre las colecciones a través de sensores de presencia e inhibición electromagnética y sensores RFID. El sistema en [22] está basado en una WSN que envía datos a un hub central. Este desarrollo usó una topología multisaltos para la WSN ya que, según los autores, esta topología permite ampliar la cobertura de medición de los sensores. Similarmente en [23] cada nodo se compone de un identificador RFID adjuntado a un objeto cultural y al dejar de ser detectado por el hub central, se activa una alarma advirtiendo el movimiento del objeto fuera de su lugar.

Habiendo descrito las soluciones e investigaciones actuales ligados al tema de esta tesis, se puede concluir que estas no llegan a satisfacer todas las necesidades o requerimientos que permiten solucionar el problema planteado en el Capítulo 1. En primer lugar, la mayoría de estos trabajos han sido desarrollados a un nivel de prototipado básico, es decir, que no contempla un desarrollo en prototipado basado en el diseño que permita validar estos dispositivos en un ambiente real. En segundo lugar, la autonomía de muchos de estos dispositivos no llega a satisfacer el requerimiento base de 6 meses, además que no se tiene información completa de las condiciones a las que se calculó dicha autonomía.

Finalmente, los trabajos que no contemplan la disponibilidad remota de los datos impide que investigadores o conservadores tengan, oportunamente, acceso a dicha información pues obliga la presencialidad.

Capítulo 3

MARCO TEÓRICO

Este capítulo presenta a detalle los conceptos más relevantes para el diseño e implementación de esta tesis. Se detallan, por ejemplo, el principal estándar de comunicaciones inalámbricas para redes de área personal, así como las distintas tecnologías inalámbricas ideales para su utilización en este trabajo.

3.1 Red de sensores inalámbricos

Una red de sensores inalámbricos [24] (WSN, del inglés *Wireless Sensor Network*) es un arreglo de pequeños sistemas digitales con sensores embebidos que se conectan inalámbricamente entre sí para la transmisión de datos hacia una estación base. Esta red está compuesta por nodos sensores que miden los parámetros físicos en el ambiente, un nodo central que recibe todos los datos de los nodos sensores, circuitos gestores de energía, unidades de control y transceptores de radiofrecuencia.

Las topologías que se pueden aplicar en una WSN dependerá de la aplicación para la que se le necesite como, por ejemplo, si es requerido una amplia cobertura de monitorización, una topología del tipo *Mesh* es ideal pues cada nodo sensor se comunican con otro más cercano hasta llegar al nodo central. La desventaja de esto, es el mayor consumo energético que implica. Por esto, una topología de tipo estrella es ideal para aplicaciones de bajo consumo pues cada nodo sensor se comunicará con el nodo central para el envío de datos [25].

3.2 Internet de las cosas

Internet de las cosas (IoT, del inglés *Internet of Things*) es un concepto que describe a la conexión de objetos a internet para reunir, analizar y distribuir datos que se puedan convertir en información y en un conocimiento posterior. El IoT se compone de las siguientes características: bajo consumo energético, bajo costo y seguridad de datos. Ya que una red IoT es útil para el análisis de datos, su uso es popular en aplicaciones médicas, de seguridad, ciudades inteligentes, domótica, entre otros.

A diferencia de una WSN, los dispositivos que conforman una red de IoT sí pueden conectarse directamente a internet. En consecuencia, es válido categorizar a una red de IoT como una red de acceso remoto mientras que una WSN, como una red de acceso local. La unión de ambos conceptos trae consigo una estructura donde se tiene una red de nodos sensores transportando sus datos entre sí hasta un nodo central que se encarga de enviar estos datos hacia internet [18].

3.3 Estándar IEEE 802.15

El estándar IEEE 802.15 [26] es un estándar para las comunicaciones inalámbricas especialmente diseñadas para redes de sensores inalámbricos (WSN), Internet de las cosas (IoT) y *wearables*. Este estándar define el nivel físico (como la banda de frecuencia utilizada), el control de acceso al medio o MAC (como la multiplexación de los nodos) y fue especialmente diseñado para redes de área personal (WPAN, del inglés *Wireless Personal Area Network*) que consiste en una baja tasa de transmisión de datos, bajo consumo de energía y bajo costo.

Este estándar presenta hasta 10 grupos de trabajo que corresponden a subcategorías con características diferentes. Esta tesis tendrá un enfoque principalmente en los grupos de trabajo 1 y 4. El grupo de trabajo 1 del estándar IEEE 802.15 (IEEE 802.15.1)

corresponde básicamente a la tecnología Bluetooth y su desarrollo en las capas física y de acceso al medio (MAC). Por otro lado, el grupo de trabajo 4 del estándar IEEE 802.15 (IEEE 802.15.4) corresponde a las tecnologías inalámbricas de baja tasa de transmisión de datos (LRWPAN). Dentro de este grupo se pueden encontrar tecnologías como ZigBee™, MiWi™ y MiWi punto a punto (P2P) [27].

IEEE 802.15 puede ser usado para el diseño de una WSN en lo que respecta a: topologías de red, frecuencia de comunicación, forma de multiplexación, entre otros. En el nivel físico se define, principalmente, la frecuencia de comunicación. Este estándar posibilita su despliegue en las siguientes tres bandas ICM (bandas destinadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas): 868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz. En el Perú, solo las bandas ICM de 915MHz y 2.4 GHz están disponibles para su uso público. Además, cada banda se divide en un número diferente de canales para determinar la menor interferencia con otro tipo de tecnologías que usen bandas similares [28]. Finalmente, el nivel de control de acceso al medio del estándar IEEE 802.15 presenta diferentes métodos de encriptación y validación de tramas que aseguran la recepción de los datos.

3.4 Tecnologías de comunicación inalámbrica

Estas tecnologías permiten el intercambio de información entre dispositivos a través de ondas electromagnéticas o luz infrarroja, es decir, sin el uso de cables. A continuación, se describirán las tecnologías inalámbricas relevantes en el desarrollo de esta tesis.

3.4.1 Zigbee

Es una tecnología basada en el estándar IEEE 802.15.4 especialmente diseñado para aplicaciones IoT. Permite el uso de diferentes topologías de red con hasta un máximo de 65000 dispositivos conectados, utiliza la banda ICM de 2.4 GHz de 16 canales y tiene

un alcance de hasta 300 metros en línea de vista y de hasta 100 metros en interiores (con obstáculos) [29].

3.4.2 Bluetooth y Bluetooth Low-Energy

Bluetooth es una tecnología perteneciente a IEEE 802.15.1 que se comunica bajo la banda ICM de 2.4 GHz y que puede transportar datos y voz. Desde su creación se han desarrollado diferentes versiones que mejoran en el ancho de banda; sin embargo, es en la versión 4.0 donde se presentó, por primera vez, su versión de bajo consumo de energía llamado Bluetooth Low Energy (BLE) que ha sido usado en múltiples aplicaciones IoT desde ese entonces. Esta versión de Bluetooth de bajo consumo de energía, comparado con su versión clásica, tiene una menor tasa de transmisión, una conexión más rápida y permite permanecer en un estado de bajo consumo de energía por un tiempo prolongado lo que se resume en una reducción de cerca del 50 % de consumo de energía [30]. Sin embargo, la desventaja de esta tecnología es su reducido alcance y débil penetración de obstáculos.

3.4.3 Wi-Fi

Wi-Fi [31] es un tipo de tecnología inalámbrica para redes de área local (WLAN) que permite la conexión de dispositivos a internet de forma inalámbrica. Esta tecnología está basada en el estándar IEEE 802.11 y opera en la banda ICM de 2.4 GHz o 5 GHz. Además, se presenta diferentes estándares según la velocidad de transmisión de datos máxima y frecuencias de comunicación (ver Tabla 3.1) [32].

TABLA 3.1: Comparación entre estándares Wi-Fi

Estándar	Ancho de banda	Frecuencias de operación
IEEE 802.11b	11 Mbps	2.4 GHz
IEEE 802.11g	54 Mbps	2.4 GHz
IEEE 802.11n	600 Mbps	2.4-5 GHz
IEEE 802.11a	54 Mbps	5 GHz
IEEE 802.11ac	1733 Mbps	2.4-5 GHz

3.4.4 Red de datos móviles

Esta es un tipo de red inalámbrica de área amplia (WWAN, del inglés *Wireless wide area network*) y hace referencia a la telefonía móvil de las generaciones 2G, 3G y 4G. Estas tecnologías permiten la transmisión de voz y datos a través de bandas de frecuencia diferentes para regiones específicas. Además, están gestionadas por operadores en cada país y cada uno de ellas se encarga de distribuir sus servicios en las diferentes bandas disponibles.

Capítulo 4

METODOLOGÍA

Este capítulo describe los métodos y herramientas utilizadas para la realización y logro de los objetivos específicos de esta tesis. Para un mejor entendimiento del desarrollo de este trabajo y basado en el diagrama de bloques de la Figura 4.1, el término “sistema” debe ser entendido como la reunión entre los componentes de hardware, software y las redes inalámbricas. Estos se detallan a continuación:

- **Hardware:** se compone de los nodos y el gateway vistos como módulos físicos.
- **Software:** se compone de la plataforma online y del firmware que describe la lógica que controla el hardware del sistema.
- **Redes inalámbricas:** se compone de la red inalámbrica interna (interconexión entre nodos y gateway) y las redes que permiten una conexión a internet (interconexión entre gateway y plataforma online)

4.1 Desarrollo del hardware del sistema

En esta sección se detallará el proceso de desarrollo del hardware del sistema, así como las estrategias utilizadas para el cumplimiento de los requerimientos referidos a este. El diagrama de bloques mostrado en la Figura 4.1 muestra, de forma general, los componentes que forman a los nodos, gateway y la interconexión entre ellos y la plataforma online. Sin embargo, para un mejor detalle a nivel del hardware modular propuesto en este trabajo, se muestra un nuevo diagrama de bloques en la Figura 4.2.

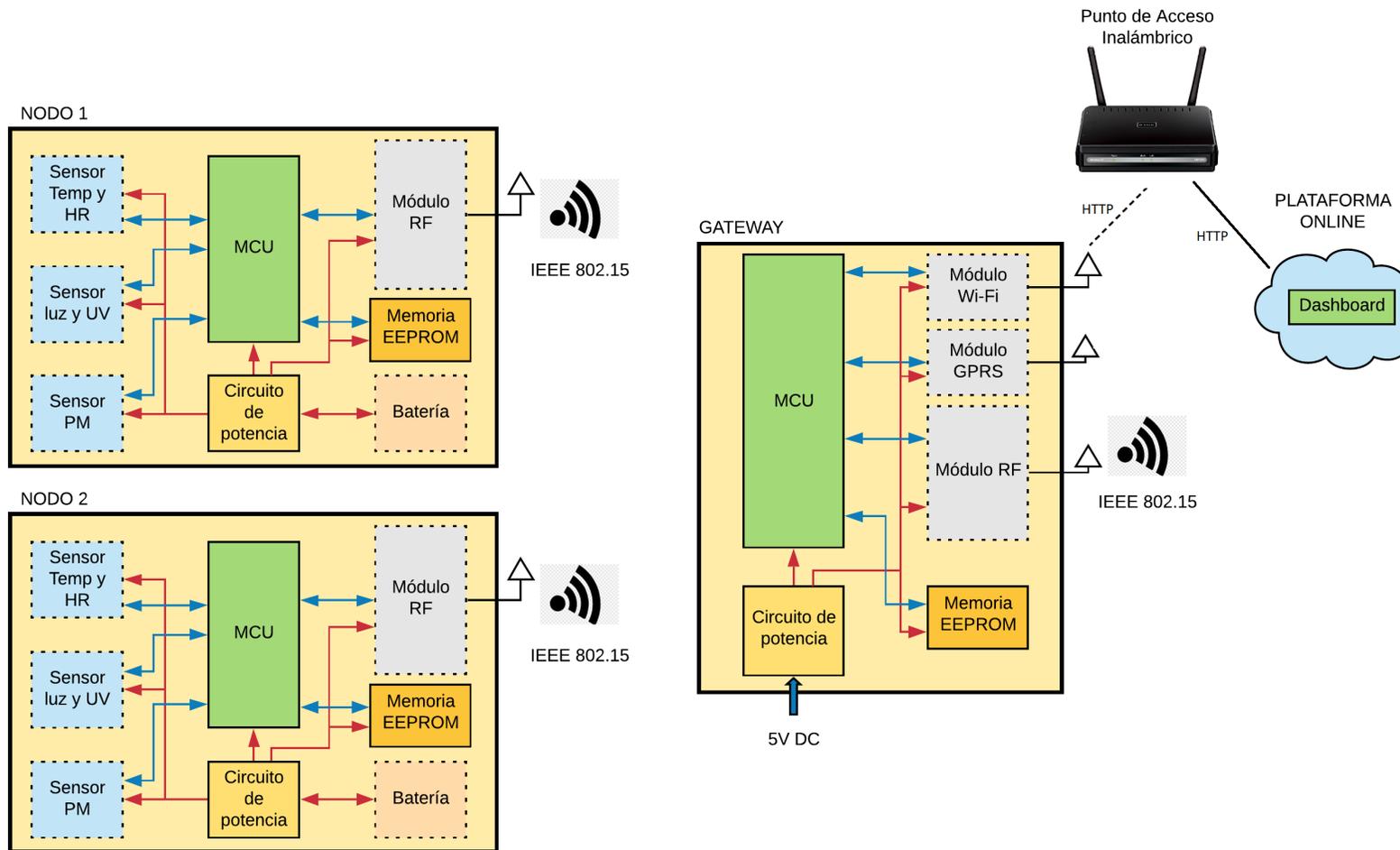


FIGURA 4.1: Diagrama de bloques general del sistema.

Basado en el alcance de esta tesis, el sistema se compone de dos nodos, un gateway, una plataforma online, una red inalámbrica interna basado en IEEE 802.15 y hasta dos redes inalámbricas para la conexión a internet. Los bloques con bordes punteados representan bloques modulares que pueden ser extraídos físicamente.

4.1.1 Hardware modular

El desarrollo de un hardware modular permite tener un único dispositivo físico con dos funcionalidades dentro de la WSN: nodo y gateway. Además, si un dispositivo es usado como nodo sensor, este puede tener incluido uno o varios sensores. En conclusión, permite al usuario contar con un dispositivo versátil y de uso más simplificado pues puede elegir los componentes (sensores y módulos de comunicación inalámbrica) que desee contar en una aplicación determinada.

El diagrama de bloques mostrado en la Figura 4.2 muestra que los módulos de comunicación inalámbrica y los sensores de temperatura, humedad, luz, UV y material particulado son bloques removibles de una placa electrónica principal llamada *main board*. Esta *main board* contiene los componentes electrónicos que tanto nodos como gateway deben tener para su funcionamiento. Los componentes electrónicos que forman la *main board* son los siguientes:

- Microcontrolador Microchip ATmega644PA: componente que realiza lectura y escritura de los sensores y módulos; y gestiona la lógica total del sistema. Además, este cuenta con un cristal externo de 1.8432 MHz necesario para una comunicación serial UART de 115200 baudios con un bajo porcentaje de error.
- Memoria EEPROM ST M24M02: componente utilizado para almacenar los datos de las mediciones de los sensores cuando no deben o no pueden ser enviados al gateway (visto desde los nodos) o a la plataforma online (visto desde el gateway).
- Multiplexor TI SN74LV4052A: este componente es utilizado para multiplexar los terminales Tx y Rx de la interfaz UART del microcontrolador y redirigirlas al módulo de comunicación inalámbrica con el que se deba intercambiar datos o configurar.

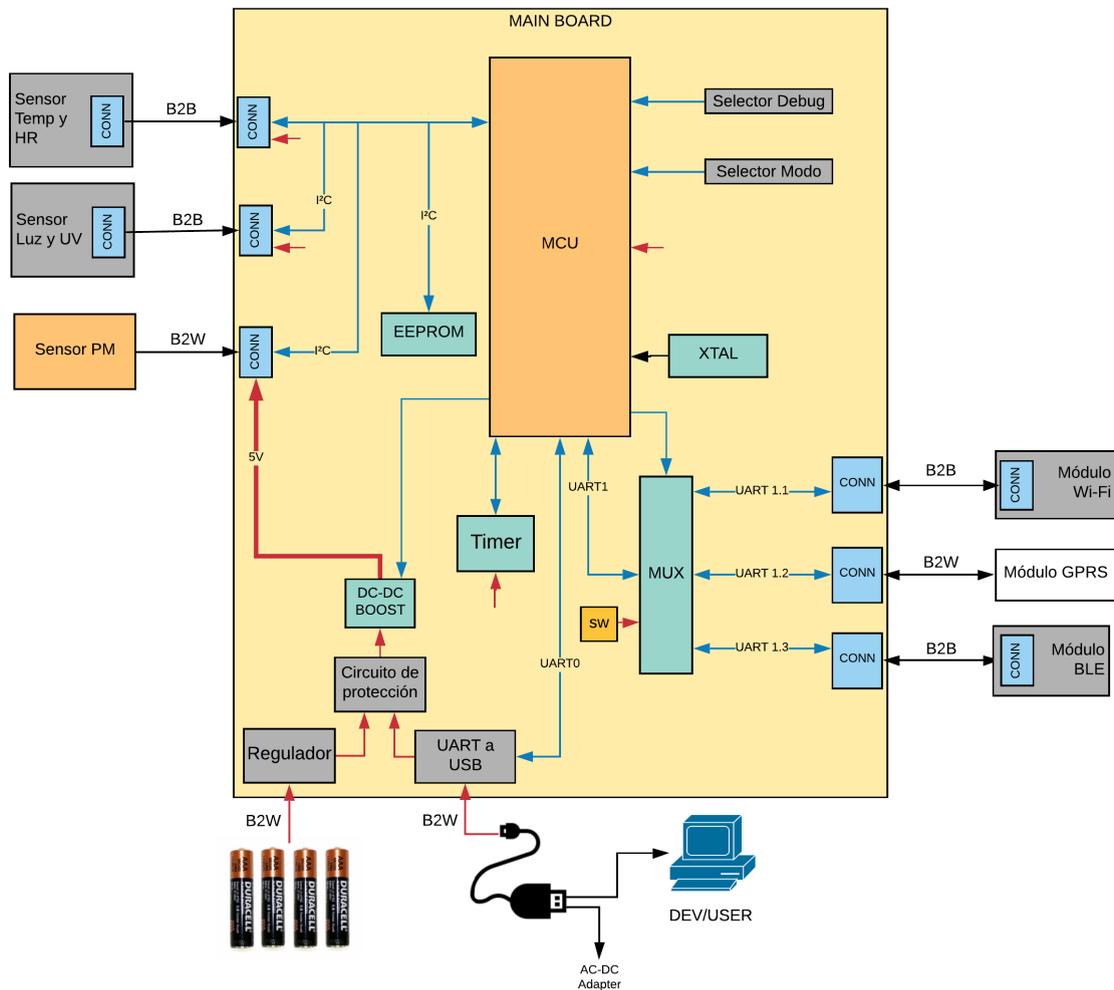


FIGURA 4.2: Diagrama de bloques del hardware modular.

En esta figura se muestra detalladamente el hardware modular en bloques. La *main board* es la placa principal que permite encajar los sensores y módulos de comunicación inalámbrica basado en la necesidad del usuario.

- *Timer* TI TPL5110: componente utilizado para determinar los intervalos de muestreo y envío de datos. Este timer genera una interrupción externa al microcontrolador cada 1 minuto aproximadamente.
- *Switches* selectores: estos componentes permiten seleccionar entre el modo de nodo sensor y el modo gateway. Además, permite seleccionar un modo de funcionamiento normal o *debug* para verificación del funcionamiento de componentes.

TABLA 4.1: Lista de sensores seleccionados

Parámetro ambiental	Marca	Modelo	Consumo		Precisión	Protocolo	Voltaje (V)
			Normal	Sleep Mode			
Temperatura	TI	HDC2010	890 μA	0.1 μA	± 0.2 °C	I ² C	3.3
Humedad relativa	TI	HDC2010	890 μA	0.1 μA	± 2 %	I ² C	3.3
Luz	Silicon Labs	Si1133	4.5 mA	0.125 nA	± 10 % lx	I ² C	3.3
Material particulado	Sensirion	SPS30	100 mA	200 μA	≥ 95 %	I ² C o UART	5

- *Switches* de potencia TI TPS22916: este componente permite encender y apagar los componentes de mayor consumo energético, lo que permite disminuir drásticamente el consumo del dispositivo cuando estos componentes no son usados.
- Circuito elevador de voltaje: este permite elevar la tensión principal de 3.3 V a 5 V necesarios para alimentar el sensor de material particulado.
- Puente UART a USB SiLabs CP2102N: este componente tiene dos funciones dentro del sistema: el primero es alimentar el sistema con una tensión de salida de 3.3 V basado en una tensión de entrada de 5 V a través de micro USB; el segundo es tener un puente entre interfaces UART a USB y permitir una comunicación directa con una PC a través de un terminal serial.
- Conectores Molex *board-to-board* (B2B) y *board-to-wire* (B2W): estos componentes mecánicos permiten remover y colocar los sensores y módulos de comunicación inalámbrica de la *main Board*. La terminología B2B y B2W hace referencia al modo de conexión: B2B indica que el conector une dos placas directamente, mientras que B2W indica que el conector une dos placas o módulos con un cableado entre ellos.

Con respecto a los sensores seleccionados, la Tabla 4.1 describe las principales características de estos. La selección fue realizada principalmente con base al consumo energético, precisión y protocolo de comunicación.

4.1.2 Estrategias para una larga autonomía

El tiempo de autonomía de un dispositivo lo determina la capacidad total de la batería que esté utilizando, el voltaje al cual esté operando y el consumo de corriente que se dé en promedio. Para esto fue importante elegir adecuadamente los componentes de potencia que requería el sistema y determinar, por software, los estados de menor consumo energético de los componentes que lo requieran. Cabe resaltar que este sistema es alimentado por cuatro baterías alcalinas de tipo AAA conectadas en serie, por lo que la capacidad total sería de aproximadamente 1200 mAh.

La selección de componentes conllevó a la utilización de sensores con un estado automático de bajo consumo de energía, es decir, cuando el sensor no se utiliza para leer o escribir en sus registros, este se encontrará en el estado de menor consumo energético sin la necesidad de enviarle ningún comando. Además, el *timer* externo seleccionado permite que el microcontrolador permanezca en el estado más bajo de consumo de energía pues no se requerirá la utilización de su *timer* interno, el cual, además, tiene un mayor consumo comparado con el *timer* externo.

Por otro lado, como se mostró en la descripción de los componentes de la *main board*, se determinó el uso de *switches* de potencia para cortar la alimentación de los componentes de mayor consumo de energía dentro del sistema. Esto permitió disminuir drásticamente el consumo de ciertos componentes hasta los 10 nA de corriente.

4.1.3 Estrategias para un volumen reducido

Para el cumplimiento del requerimiento de un volumen reducido, se determinó el uso de componentes de montaje superficial (SMT, *Surface Mount Technology*) ya que, en comparación con los componentes de montaje *Through-Hole* (THT), tienen un volumen mucho más reducido sin disminuir la potencia requerida para esta aplicación.

El uso de componentes de volumen reducido como los SMD (*surface-mount devices*), no garantiza que el producto final sea también de volumen reducido. Es por esto que se procedió con la creación de un modelo 3D que permita visualizar, ubicar y reordenar, eficientemente, todos los componentes que integran el hardware del sistema propuesto. Esto se realizó con programas como EAGLE y Fusion 360, ambos desarrollados por Autodesk. Se procedió a importar cada componente de forma individual para su posterior agrupación en un único proyecto dentro de Fusion 360. De esta forma se definieron hasta 5 posicionamientos diferentes de donde se eligió el más eficiente en cuanto a volumen ocupado y simetría en su diseño. Este modelo 3D garantizó que en la implementación física no hayan habido inexactitudes al momento de proceder con la ubicación y orden de cada componente.

4.2 Redes inalámbricas

El requerimiento de acceso remoto de datos implica obligatoriamente una conexión a internet para el envío de datos. Dadas las desventajas conocidas que tiene una conexión alámbrica para una aplicación de pequeño tamaño y bajo consumo como esta, se optó el uso de una conexión inalámbrica a través de wifi. Sin embargo, es necesario considerar dos posibles escenarios cuando se utiliza una tecnología inalámbrica como esta: cuando la cobertura wifi del espacio a monitorear no llega a todos los espacios donde se desea medir algún parámetro ambiental, y otro donde la cobertura wifi es inexistente.

En el primer escenario, la implementación de una WSN fue propuesta con el fin de ampliar la cobertura de medición en espacios donde no haya cobertura wifi. Esta WSN está compuesta por dos elementos: nodos sensores encargados de medir los parámetros ambientales; y un gateway encargado de recolectar los datos de los nodos sensores y enviarlos hacia internet. Esto permite que sea únicamente el gateway el que requiera estar dentro de la cobertura wifi ya que puede estar ubicado a una distancia considerable del área a monitorear. Por otro lado, para el segundo escenario se planteó el uso de la red de

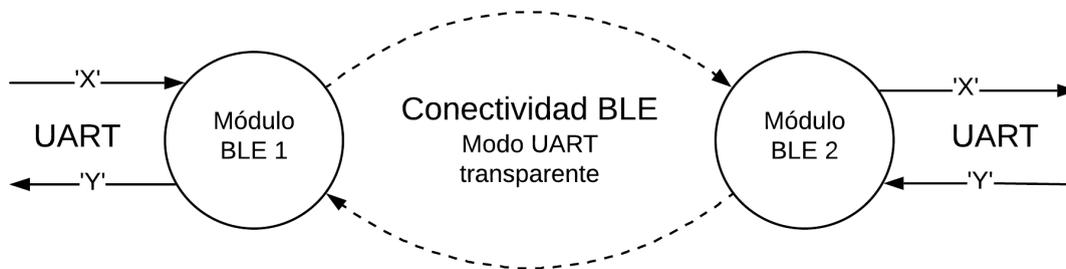


FIGURA 4.3: Funcionalidad UART transparente en BLE.

El modo UART transparente permite una comunicación bidireccional *half-duplex* donde todo lo que se envía por la interfaz UART (Tx) de un módulo BLE, se recibirá por la interfaz UART (Rx) del otro módulo BLE.

datos móviles 2G cuando la red wifi no se encuentre disponible. De esta forma, se asegura el funcionamiento continuo del sistema en cuanto a envío de datos a internet.

Además de las comunicaciones inalámbricas a través de wifi y datos móviles 2G, fue necesario considerar el tipo de comunicación inalámbrica dentro de la WSN propuesta. Esta comunicación por radiofrecuencia (RF) está basada en el estándar IEEE 802.15 dado que es ideal para redes de área personal y de bajo consumo de energía.

4.2.1 Red inalámbrica entre nodo y gateway

Para la intercomunicación entre nodos y gateway se consideró, específicamente, el uso de la tecnología Bluetooth (perteneciente a IEEE 802.15.1) en su versión de bajo consumo de energía, es decir, *Bluetooth Low-Energy (BLE)* que se encuentra dentro de la tecnología base Bluetooth 4.0 en adelante. El módulo seleccionado para permitir esta comunicación fue el Microchip RN4870. Este módulo cuenta con una funcionalidad llamada UART transparente que permite simplificar la transmisión serial entre dos módulos BLE. Esta funcionalidad se explica fácilmente en la Figura 4.3. Además, tiene un alcance de hasta 50 m al aire libre y modos de bajo consumo de energía con un valor típico de hasta 1 μ A de corriente.

4.2.2 Red inalámbrica entre gateway y plataforma online

EL gateway posee la capacidad de tener hasta tres redes inalámbricas diferentes: BLE, Wi-Fi y red de datos móviles 2G (GPRS). De estas tres, las tecnologías Wi-Fi y GPRS son usadas para enviar datos a la plataforma online.

El módulo Wi-Fi seleccionado fue el ATWINC1500 de Microchip. El microcontrolador se comunica con este módulo a través de su interfaz UART y comandos AT a una velocidad de 115200 baudios. Fue especialmente seleccionado por una sencilla funcionalidad que permite al usuario proveer la clave de la red wifi del espacio donde se use. Esta funcionalidad es un estado llamado Provisión HTTP y se describe en la Figura 4.4. El gateway intentará, en primer lugar, conectarse al último punto de acceso (AP, del inglés *Access point*) con el que tuvo una conexión exitosa. Si no puede conectarse, activará el modo de provisión HTTP. A partir de esto, el módulo Wi-Fi funcionará como un AP el cual el usuario puede conectarse y lo redirigirá automáticamente a una interfaz web donde tendrá que colocar el nombre y contraseña del nuevo AP que se desee conectar. Luego de esto, el módulo cambiará de modo provisión HTTP al modo estación que conectará con el AP deseado. Esta funcionalidad evita que se añada un modo de ingreso de credenciales a través del microcontrolador.

El módulo GPRS seleccionado fue el SIM800L de Simcom. El microcontrolador se comunica con este módulo, al igual que el módulo Wi-Fi, a través de su interfaz UART y comandos AT a una velocidad de 115200 baudios. Al utilizar una red gestionada por operadores móviles, este requiere de una tarjeta SIM de cualquier operadora que cuente con cobertura 2G. Además, requerirá que esa línea cuente con saldo o datos para poder usar la tecnología GPRS que permite la conexión a internet a través de la red celular 2G.

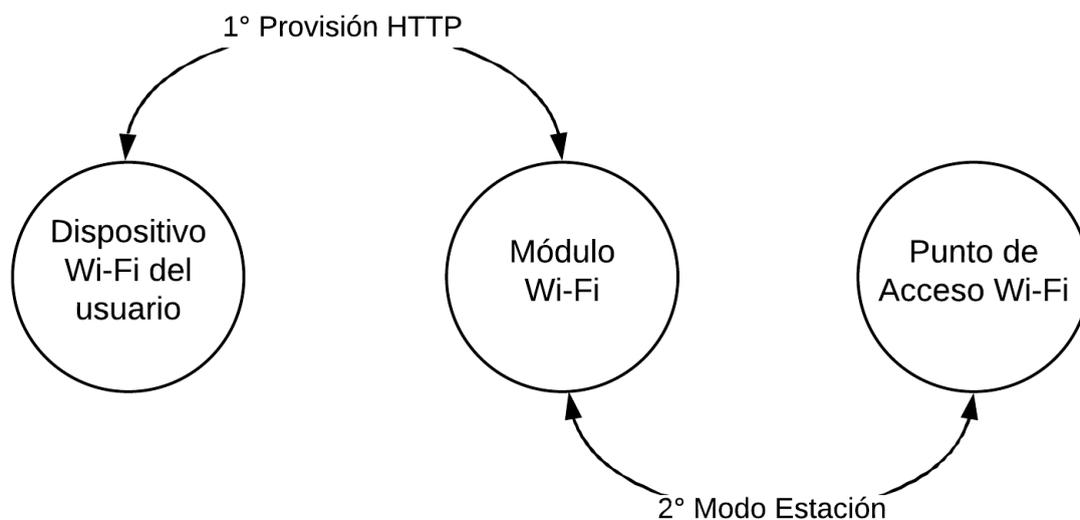


FIGURA 4.4: Funcionalidad Provisión HTTP del módulo Wi-Fi.

Al activarse esta funcionalidad, el módulo esperará que el usuario provea del nombre y contraseña del AP que deba conectarse. Luego de esto, el módulo conectará con el AP deseado automáticamente y lo tendrá como conexión por defecto.

4.3 Desarrollo del software del sistema

El software del sistema lo constituyen la plataforma online y el firmware que tiene programado el microcontrolador. Este último es único para los tres dispositivos desarrollados ya que, al tratarse de un hardware modular, debe contener el algoritmo de funcionamiento tanto para nodos como para el gateway. En este sentido, a continuación se detallarán las herramientas, componentes y métodos utilizados para el desarrollo del software de este sistema.

4.3.1 Plataforma online

La plataforma online es la que recibe los datos de parte del gateway a través de internet. La plataforma seleccionada para este trabajo fue Ubidots. Esta es una plataforma IoT que permite la conexión de dispositivos que cuenten con cualquier conectividad

hacia internet y permite su utilización gratuita para fines académicos y desarrollo de proyectos no comerciales (suscripción para aplicaciones en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas o STEM).

Dentro de la plataforma se crearon dos tipos de dispositivos que contienen variables de configuración y variables de campo: Gateway Config y Gateway Campo respectivamente (ver Figura 4.5). Las variables de configuración permiten al usuario elegir el tiempo de muestreo y tiempo de envío que desee para su aplicación; además, una de estas variables indica al usuario la conexión exitosa entre el gateway y la plataforma. El tiempo de muestreo representa el intervalo tiempo a la que los nodos medirán los parámetros ambientales y lo guardarán en su respectiva memoria EEPROM. Por otro lado, el tiempo de envío representa el intervalo de tiempo a la que los nodos enviarán, al gateway, la medición actual de los sensores. Las variables de campo son los valores de los parámetros ambientales medidos por los nodos. En este caso, al tratarse de solo dos nodos, se tiene un total de diez variables de campo: seis variables para el nodo 1 y 4 variables para el nodo 2 basado en el alcance de esta tesis.

Estas variables llegan en un formato decimal de los valores de los registros de los sensores de 16 bits. A partir de estos valores, es la plataforma quien se encarga de realizar la operación matemática que finalizará con el valor real a las unidades correspondientes de la variable medida. Las únicas variables que no necesitan conversión son las variables del sensor de material particulado.

El protocolo HTTP fue el utilizado para la comunicación entre el gateway y la plataforma online. A través de una solicitud basada en el método GET HTTP y el direccionamiento de una URL, el gateway puede leer y escribir las diferentes variables descritas anteriormente. La trama de la URL a la cual se direcciona en cada solicitud a través del método GET se describe en la Figura 4.6

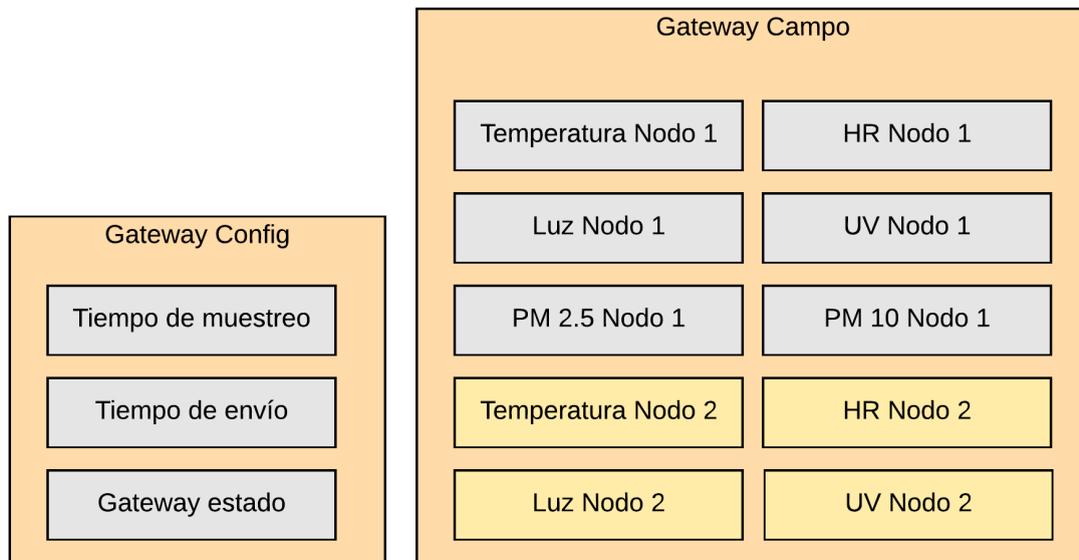


FIGURA 4.5: Variables de configuración y campo dentro de Ubidots.

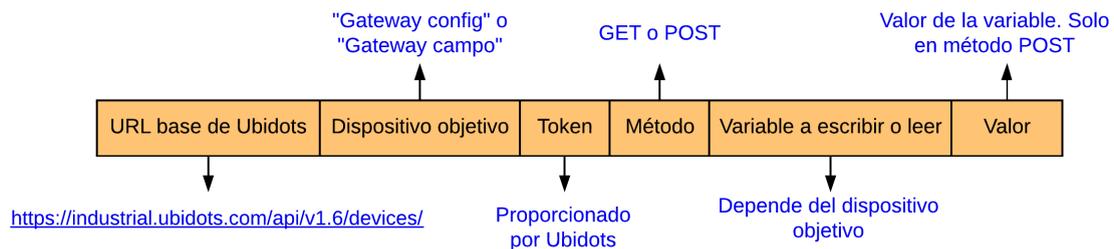


FIGURA 4.6: Trama de la URL direccionada con el método GET HTTP.

4.3.2 Firmware del microcontrolador

Dado que la propuesta en hardware de este sistema es de uno modular, permite que el firmware tanto para nodos como para el gateway sea el mismo. De esta forma, el algoritmo debe ser capaz de diferenciar entre los modos de operación elegido por el usuario y debe administrar los componentes que estén asociados a dicho modo. La Figura 4.7 muestra el flujo de intercambio de información entre nodos, gateway y plataforma online. Esta forma gráfica es una mejor forma de entenderlo dada la complejidad del flujo que sigue el firmware del sistema.

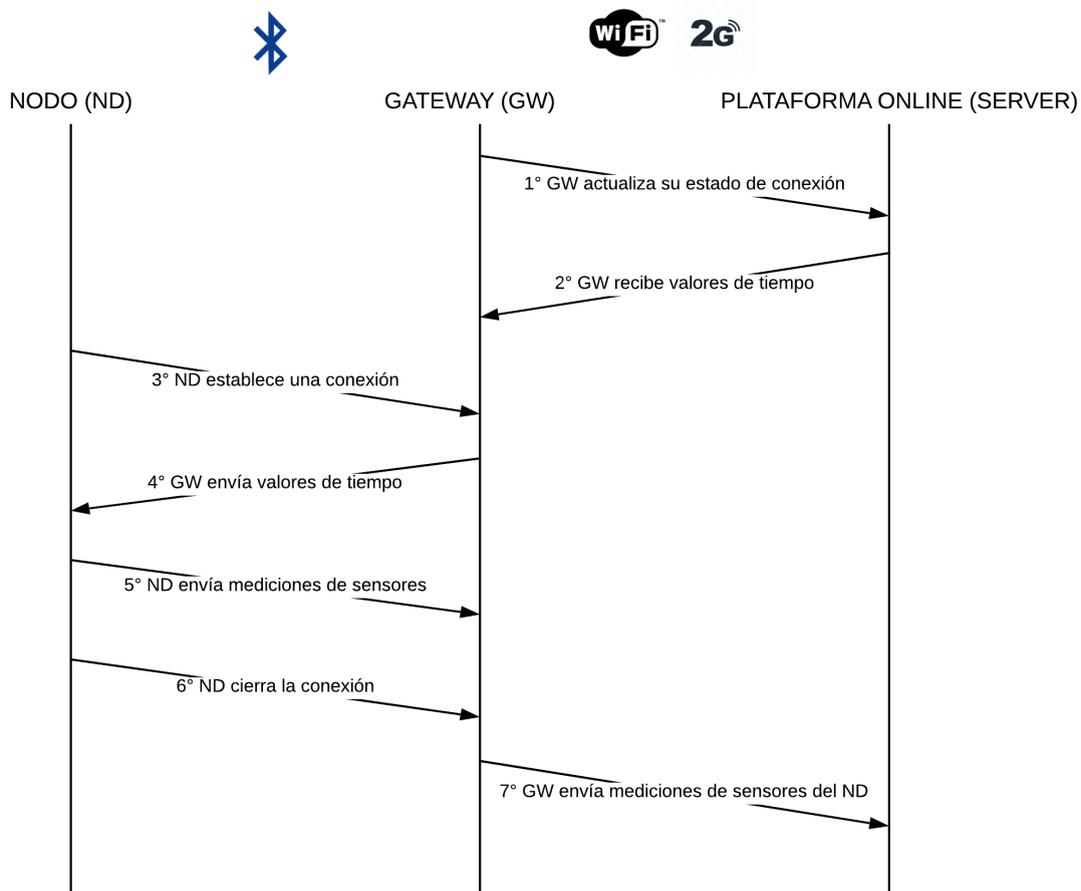


FIGURA 4.7: Flujo de intercambio de información entre nodos (ND), gateway (GW) y plataforma online (SERVER).

Aquí no se muestra la lógica interna de cada componente, sino únicamente la forma en la que se interconectan. El flujo es continuo desde la etapa 1 a la 7, donde es imprescindible que todas las etapas se establezcan o sucedan.

Dado que el hardware cuenta con selectores de modos, el firmware puede hacer esa diferenciación en el funcionamiento. El usuario puede seleccionar el modo de funcionamiento que desee para dicho dispositivo (nodo o gateway). Además, puede seleccionar entre un modo de operación normal o un modo de depuración principalmente usado para obtener los datos guardados en la EEPROM.

Los datos de la EEPROM pueden ser obtenidos a través de la opción de captura

de datos de cualquier programa de comunicación serial (Realterm, por ejemplo) y guardando el archivo con una extensión *.csv, el cual permite ordenar los datos en columnas para una posterior visualización en Microsoft Excel. Los datos obtenidos aún no están convertidos a las unidades correspondientes, por lo que, manualmente, se debe añadir una nueva columna y aplicar la fórmula correspondiente y así tener los datos a las unidades correctas.

4.4 Proceso de validación

La validación del funcionamiento del sistema es parte importante en este trabajo pues permite identificar y corregir errores que se presentaron a lo largo de la implementación. Cada etapa del desarrollo de este sistema (hardware, software y redes inalámbricas) fue validada en campo y en pruebas preliminares en laboratorio. Fueron dos espacios donde se desarrolló esta validación: el laboratorio de sistemas embebidos L414 de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC) y el depósito de cerámicos del Museo de sitio de Pachacamac en Lurín.

4.4.1 Validación del hardware

El proceso de validación del hardware se basó en los requerimientos que se confieren a ella. En este caso, fue necesario validar el volumen alcanzado en los diferentes tipos de dispositivos propuestos (nodos y gateway) y la autonomía del sistema principalmente en los nodos, dado que el gateway es un dispositivo diseñado para permanecer conectado a una fuente de voltaje continuo de 5 V como un adaptador.

Para validar el volumen alcanzado de la carcasa se procedió a obtener las dimensiones del modelo 3D realizado pues este no varía significativamente en la implementación real. Además, la perspectiva visual se validó con conservadores encargados del

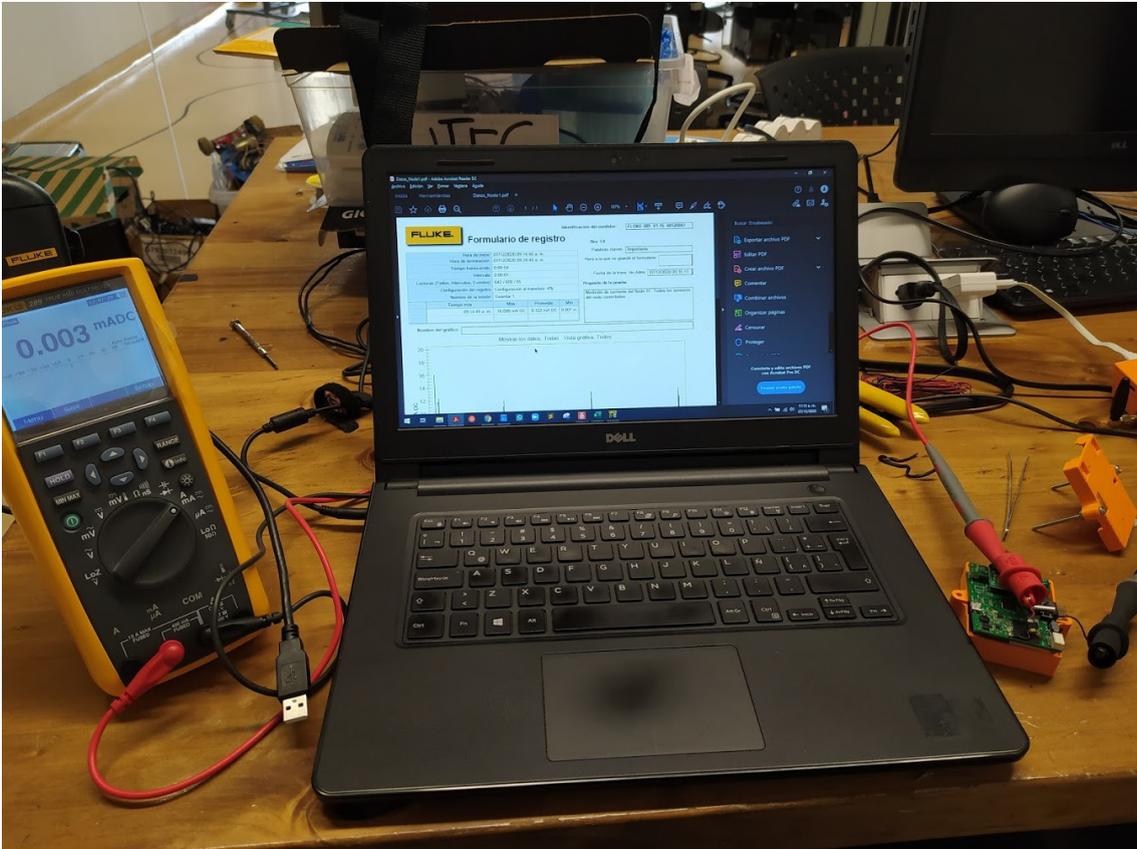


FIGURA 4.8: Medición de corriente de un nodo con el multímetro Fluke 289.

depósito de cerámicos en una consulta para poder calificar el impacto visual que tuvo el volumen de los dispositivos comparado con el de los objetos culturales.

Por otro lado, la validación de la autonomía sí requirió de la implementación física del sistema. A partir de eso, fue necesario contar con una herramienta que permita medir corrientes a niveles de μA y mA ; y que, además, permita registrar estos valores en un tiempo determinado y obtenerlos posteriormente en una PC. Para esto se contó con el multímetro Fluke 289 y el laboratorio L414 de la UTEC para la realización de las pruebas. Estas pruebas consistieron en configurar a los nodos a un tiempo de muestreo de 1 minuto y un tiempo de envío de 3 minutos, y registrar y guardar las mediciones de corriente durante 10 minutos a un tiempo de muestreo de 1 segundo con el Fluke 289 (Figura 4.8).

4.4.2 Validación de las redes inalámbricas

En esta sección se realizó la validación a través del envío de datos simulados, es decir, datos ficticios configurados manualmente, tanto en el envío de datos del nodo al gateway a través de BLE como en el envío de datos del gateway a la plataforma a través de wifi y GPRS.

Se pudo validar también la latencia en el intercambio de datos en las redes inalámbricas. Para esto, la latencia mínima se calculó midiendo el tiempo entre un intento de conexión y la finalización o cierre de dicha conexión al primer intento. Por otro lado, la latencia máxima se determinó midiendo el tiempo entre un intento de conexión y la finalización o cierre de dicha conexión al último intento.

En este proceso se aprovecharon los componentes en hardware que poseen los dispositivos. En este caso, se utilizaron tanto el puente UART a USB como el multiplexor UART descritos en la Sección 4.1.1. Se conectaron nodos y gateway a puertos USB de una PC y, a través de un terminal serial, se enviaron los respectivos comandos ASCII (para el módulo BLE) y AT (para los módulos Wi-Fi y GPRS) que permitían el envío de datos, en este caso, manuales (ver Figura 4.9).

4.4.3 Validación del software

Esta sección consistió en verificar tanto el desempeño a las consultas HTTP de la plataforma online, como el flujo de intercambio de información entre nodos y gateways utilizando BLE. Para la validación del desempeño de las consultas a la plataforma a través de HTTP, se utilizó un software cliente HTTP llamado Insomnia Core. Utilizando la versión gratuita, este software permite realizar consultas GET y POST HTTP, los cuales se utilizaron para obtener y escribir en variables creadas en la plataforma y verificar la respuesta y latencia del servidor de Ubidots.

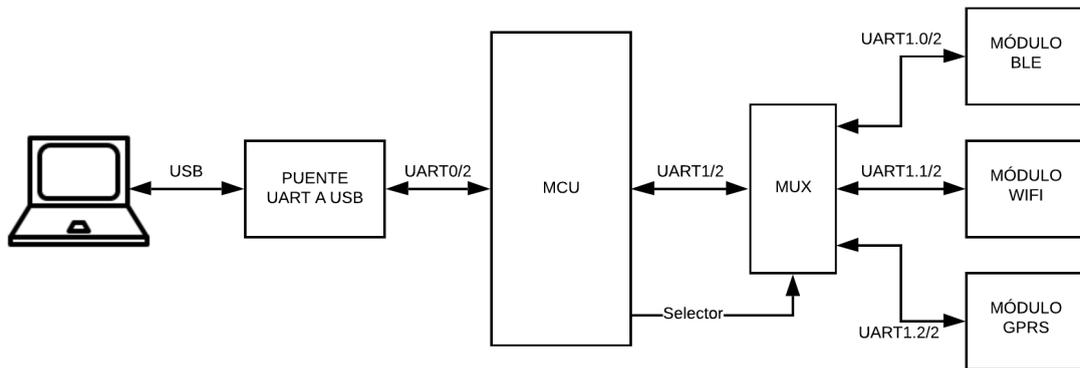


FIGURA 4.9: Esquema del hardware para las pruebas de validación de las redes inalámbricas.

Cada módulo fue validado individualmente realizando su configuración de forma manual a través de una PC y utilizando el modo de depuración de los dispositivos.

Por otro lado, para validar el flujo de intercambio de información entre nodos y gateway, se utilizó un terminal serial para PC llamado Realterm y los puentes UART a USB de cada dispositivo. Se conectaron un nodo y el gateway a dos puertos USB de una PC y se abrieron dos sesiones seriales en el software Realterm con lo cual se pudo observar los estados en los que se encontraba cada dispositivo y validar el correcto flujo de intercambio de información descrito en el el firmware programado al microcontrolador.

Capítulo 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos luego de la aplicación de la metodología presentada en el Capítulo 4. De la misma forma, se presentará los resultados de la implementación del hardware, software y la aplicación de las redes de comunicación inalámbrica. Cabe recordar los requerimientos establecidos inicialmente, pues los resultados determinaron si estos se cumplieron o no.

- Volumen reducido de la carcasa no mayor a 150 cm³.
- Larga autonomía de 6 meses a un tiempo de envío de 30 min.
- Accesibilidad remota de datos sin depender de una total cobertura wifi
- Capacidad de contener un amplio set de sensores que incluyan temperatura, humedad relativa, luz y material particulado

5.1 Implementación del hardware

La implementación del hardware sistema resultó en la implementación de tres dispositivos que se muestran en la Figura 5.1. Los resultados obtenidos al implementar físicamente el sistema se basaron en los requerimientos referidos a este, los cuales son: volumen reducido y larga autonomía. Cabe resaltar que se identificó como nodo N1 al que sí presenta el sensor de material particulado, mientras que al otro nodo se le identificó como nodo N2 (ver Figura 5.1).



FIGURA 5.1: Dispositivos implementados a nivel de hardware del sistema. El Nodo N1 corresponde al nodo que presenta el sensor de material particulado. La antena asociada al gateway es necesaria para la conectividad GPRS en una red celular 2G.

5.1.1 Volumen alcanzado

Al haberse desarrollado un sistema modular a nivel de hardware, el volumen que se pudo obtener varió de dos formas: si el dispositivo fue utilizado como nodo o gateway; y si, al usarse como nodo, se usó o no el sensor de material particulado (PM). El gateway tuvo un único volumen que no dependía de la cantidad de módulos de comunicación a usar. De forma similar, los nodos tenían el mismo volumen independientemente del uso o no de los sensores de temperatura, HR, luz y UV. A partir de esto, se obtuvo los siguientes valores de las dimensiones y volumen de cada tipo de dispositivo:

- Gateway: $6.4\text{ cm} \times 4.8\text{ cm} \times 3.1\text{ cm}$ (Volumen = 95.23 cm^3)
- Nodo sin sensor PM: $6.4\text{ cm} \times 4.8\text{ cm} \times 3.9\text{ cm}$ (Volumen = 76.8 cm^3)
- Nodo con sensor PM: $6.4\text{ cm} \times 4.8\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$ (Volumen = 119.81 cm^3)

En el depósito de cerámicos del Museo de Sitio de Pachacamac, el volumen reducido de estos dispositivos permitió su colocación entre los objetos culturales como se puede apreciar en la Figura 5.2. La colocación cercana a estos objetos permitió que las



FIGURA 5.2: Nodo N1 situado entre las cerámicas del depósito del Museo de Pachacamac.

lecturas de los parámetros ambientales sean las más parecidas a las que realmente estaban siendo afectados estos bienes.

5.1.2 Autonomía energética

El nodo N2 fue tomado como referencia para la toma de datos de la corriente que consume de la batería a partir de la metodología descrita en la sección 4.4.1. Los resultados obtenidos fueron utilizados para calcular el consumo promedio mensual que se daría al utilizar los dispositivos desarrollados en este trabajo. A partir de esto, se obtuvo lo mostrado en la Figura 5.3.

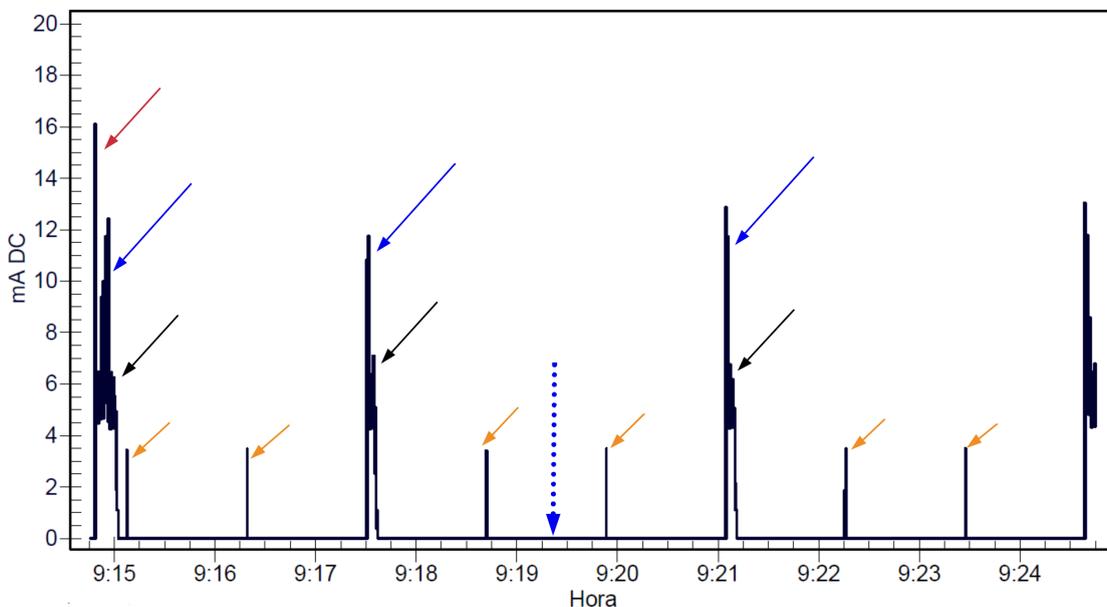


FIGURA 5.3: Gráfico de corriente del nodo N2 en mA DC vs. hora. Las flechas de cada color indican estados específicos de inicialización (rojo), conexión (azul), medición y envío (negro), interrupción (naranja) y reposo (azul punteada)

Las mediciones fueron tomadas durante 10 minutos desde las 9:14:46 hasta las 9:24:45. Las flechas de colores representan estados determinados durante el funcionamiento del Nodo N2, los cuales son los siguientes:

- Estado de inicialización, el cual sucede por una única vez al encender o reiniciar el dispositivo: flecha roja.
- Estado de intento y logro de conexión a través de BLE: flecha azul.
- Estado de medición y envío de estos datos a través de BLE: flecha negra.
- Estado de interrupción externa por parte del *timer* y la medición de los sensores: flecha naranja.
- Estado de reposo o de menor consumo de energía: flecha azul punteada.

TABLA 5.1: Consumo de corriente correspondiente a cada estado en Nodo N2.

Estado	Duración (s)	Corriente (mA)	Consumo (μAh)
Inicialización	4.2	16	18.67
Conexión BLE	2.1	12.5	7.29
Medición + Envío	3.5	6.5	6.32
Interrupción + Medición	0.5	4	0.56
Reposo	1800	0.02	10

Cada uno de estos estados tiene una determinada duración y se repiten (excepto el estado de inicialización) continuamente y dependiendo de la configuración de los tiempos de muestreo y envío determinados por el usuario. A partir de la gráfica mostrada en la Figura 5.3, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 5.1 que corresponden al consumo dado durante la medición de corriente de 10 minutos. A partir de esa Tabla, se pudo determinar el tiempo de vida estimado (t_{estimado}) del dispositivo considerando un tiempo de muestreo y envío de 30 minutos ($t_{\text{envío en horas}} = 0.5$) y la capacidad de 1200 mAh de las baterías utilizadas (C_{bat}). La ecuación para hallar este tiempo de vida estimado es la siguiente:

$$t_{\text{estimado}} = \frac{C_{\text{bat}} \cdot t_{\text{envío en horas}}}{C_{\text{T}}}, \quad (5.1)$$

donde C_{T} es la suma total de los consumos de cada estado para el Nodo N2, con lo cual $C_{\text{T}} = 0.043$ mAh. De esta forma, se obtiene un t_{estimado} igual a 13953.49 horas, lo cual es equivalente a un tiempo de vida de 19 meses aproximadamente.

La gráfica mostrada en la Figura 5.3 correspondiente al Nodo N2 puede ser aproximada también para el Nodo N1; sin embargo, se debe considerar los 100 mA de consumo que corresponde a la corriente a través del dispositivo cuando utiliza el sensor de material particulado (ver Tabla 5.2). A partir de esa tabla, se tiene un $C_{\text{T}} = 0.099$ mAh y reemplazando estos valores en la ecuación 5.1, se tiene un t_{estimado} igual a 6037.23 horas, lo cual es equivalente a un tiempo de vida de 8 meses aproximadamente.

Con base en lo descrito en el Capítulo 2 y habiendo referenciado el trabajo desarrollado por los autores en [21], se puede comparar el tiempo de vida de este sistema

TABLA 5.2: Consumo de corriente correspondiente a cada estado en Nodo N1.

Estado	Duración (s)	Corriente (mA)	Consumo (μAh)
Inicialización	4.2	16	18.67
Conexión BLE	3	12.5	10.41
Medición + Envío	4	25.55	28.39
Interrupción + Medición	2	30.44	16.91
Reposo	1800	0.05	25

TABLA 5.3: Tiempos de vida del sistema para diferentes intervalos de envío.

Intervalo de envío (min)	Consumo mensual (mA)		Tiempo de vida (meses)	
	N1	N2	N1	N2
5	1200	300	1	4
10	400	171.43	3	7
30	150	63.16	8	19
60	92.31	38.71	13	31

teniendo el mismo intervalo de envío de 10 minutos. De esta forma, la Tabla 5.3 muestra los tiempos de vida de los nodos N1 y N2 con respecto a diferentes intervalos de envío.

Cabe resaltar que la autonomía presentada ha sido tomada con referencia a una conexión exitosa en el primer intento de conexión entre el nodo y el gateway. Cuando el gateway se encuentre ocupado y no pueda responder al nodo, este último intentará una reconexión un máximo de tres veces. Si este caso sucediera, el nodo estará en el estado de Conexión BLE por mayor tiempo lo que ocasionaría que el tiempo de vida del dispositivo disminuya.

5.2 Implementación de las redes inalámbricas

Los resultados obtenidos luego de la implementación de las redes inalámbricas junto con el hardware del sistema permiten conocer el alcance que se tienen entre dispositivos dentro de cada red inalámbrica. Además, la latencia máxima y mínima para concretar un intercambio de datos fue, también, determinado.

5.2.1 Implementación de la red Bluetooth *Low-Energy*

Esta sección muestra el alcance máximo a la que deberá situarse a nodos y gateway para una exitosa conexión entre ellos a través de BLE. Esto consistió en realizar, cada 1 minuto, intentos de conexión en línea de vista directa desde el nodo al gateway ampliando la distancia entre ellos continuamente hasta que la conexión no se dé más. De esta forma, el alcance máximo obtenido fue de 15 metros. Sin embargo, esto varía dependiendo del entorno donde se encuentren los dispositivos.

Particularmente, el depósito de cerámicos del Museo de Pachacamac se encuentra rodeado de estantes de metal lo cual impidieron una conexión exitosa entre nodo y gateway cuando estos dispositivos se encontraban a un nivel bajo o medio del suelo. Por tal motivo, al colocarlos a un nivel alto por encima de los estantes (ver Figura 5.4), la conexión resultó sin inconvenientes y a una mayor distancia.

En las pruebas realizadas también se pudo determinar la latencia máxima y mínima que existe en un intercambio de datos entre nodos y gateway al realizarse una exitosa conexión. A través de la metodología descrita en la Sección 4.4.2, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 5.4.

5.2.2 Implementación de las redes wifi y GPRS

La implementación de las redes wifi y GPRS, únicas para el gateway, permite también determinar un alcance y latencias en un intercambio de datos. Al usarse wifi, el alcance máximo entre un gateway y un AP dependerá de la potencia de salida que tenga dicho AP y de los obstáculos físicos que hayan en el espacio. De esta forma, el gateway podrá conectarse a una red wifi en un espacio donde haya cobertura de esta tecnología. Por otro lado, es complicado conocer el alcance entre el gateway y una antena 2G (al usarse GPRS) dada la dificultad de conocer la ubicación de estas antenas, por lo que bastaría,



FIGURA 5.4: Nodo N1 colocado a un nivel alto para una conexión exitosa.

La figura muestra al nodo N1 colocado por encima de los estantes de metal que impedían una exitosa conexión con el gateway ubicado a 15 metros de ahí. Además, puede observarse que se encuentra a una altura similar al *datalogger* ya instalado (parte central de la imagen)

también, con conocer la cobertura 2G disponible en un espacio a través de un celular convencional.

La latencia en el intercambio de información entre el gateway y el servidor de la plataforma online dependerá de la red a usar. Estos resultados se muestran en la Tabla 5.4 los cuales fueron resultado del promedio de hasta 20 pruebas de conexión a lo largo de un día. Estos datos se determinan desde el intento de envío de datos, hasta la visualización de estos datos en el *dashboard* de Ubidots. Dada la baja velocidad que implica el uso de la red 2G para el envío de datos (comparado con 3G o 4G) la latencia es considerablemente mayor utilizando esta red que al usar wifi.

TABLA 5.4: Latencia máxima y mínima en el uso de las diferentes redes inalámbricas implementadas.

Red inalámbrica	Latencia mínima (s)	Latencia máxima (s)
BLE	5.6	19.8
Wi-Fi	3	5
GPRS	10	20

Las condiciones a las que se obtuvieron los datos de latencia bajo wifi son los siguientes: un RSSI de -59 dBm y un ancho de banda de 24 mbps. Por otro lado, las condiciones de comunicación bajo GPRS fueron las siguientes: un RSSI de -73 dBm en la banda 4 EDGE de la operadora Entel. Estos datos se obtuvieron con una aplicación en Android llamada *Network Cell Info Lite* y en la validación individual de cada módulo de comunicación inalámbrica que se describió en la sección 4.4.2.

5.3 Implementación del software

El software del sistema está compuesto por la plataforma online y el firmware programado al microcontrolador. La plataforma online Ubidots permitió el diseño de un *dashboard* a través de *widgets* predeterminados o personalizados. Este trabajo consta de dos *dashboards* con finalidades diferentes.

El primer *dashboard* permite determinar el tiempo de muestreo y envío de los nodos, y permite visualizar el estado activo o de conexión exitosa del gateway al servidor de Ubidots (ver Figura 5.7). Además, este presenta una tabla de equivalencia de tiempos que permite al usuario conocer el tiempo (en minutos) que tiene asignado el muestreo y envío. Un hecho importante es cuando el usuario desee cambiar los tiempos de muestreo y envío. El gateway lee continuamente, cada 5 minutos, los tiempos de muestreo y envío desde el servidor. De esta forma, el tiempo máximo en el que el gateway obtenga los nuevos valores en los tiempos, será de 5 minutos. Por otra parte, para que los tiempos se



FIGURA 5.5: Historial de datos de temperatura del nodo N2 en Ubidots.

Este historial solo está disponible para usuarios administradores. En esta caso, se muestra la temperatura del nodo N2 durante 7 horas del día 17 de diciembre en el Museo de Pachacamac.

hagan efectivos en los nodos, se deberá esperar a una siguiente iteración por parte de los nodos o se deberá hacer un reseteo manual para hacerlo efectivo inmediatamente.

El otro *dashboard* permite la visualización de los diez parámetros ambientales medidos por los dos nodos, mostrando siempre el último valor recibido de parte del gateway. Cada una de las variables que pueden visualizarse en el *dashboard* de campo (Figura 5.8) presenta un historial a través de un gráfico que puede ser accedido directamente desde ese *dashboard*. Esto solo está al alcance de un usuario administrador del *dashboard* en cuestión y se retiene solo por un mes (suscripción para aplicaciones en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas o STEM). La Figura 5.5 muestra, por ejemplo, la gráfica historial de las mediciones de temperatura realizadas por el nodo N1 durante las pruebas en el depósito de cerámicos del Museo de Pachacamac.

El firmware del sistema fue desarrollado basado en el alcance de esta tesis y en las limitaciones que se tiene con la suscripción STEM de Ubidots. De esta forma, el firmware está limitado al funcionamiento de un gateway y dos nodos, por lo que si se

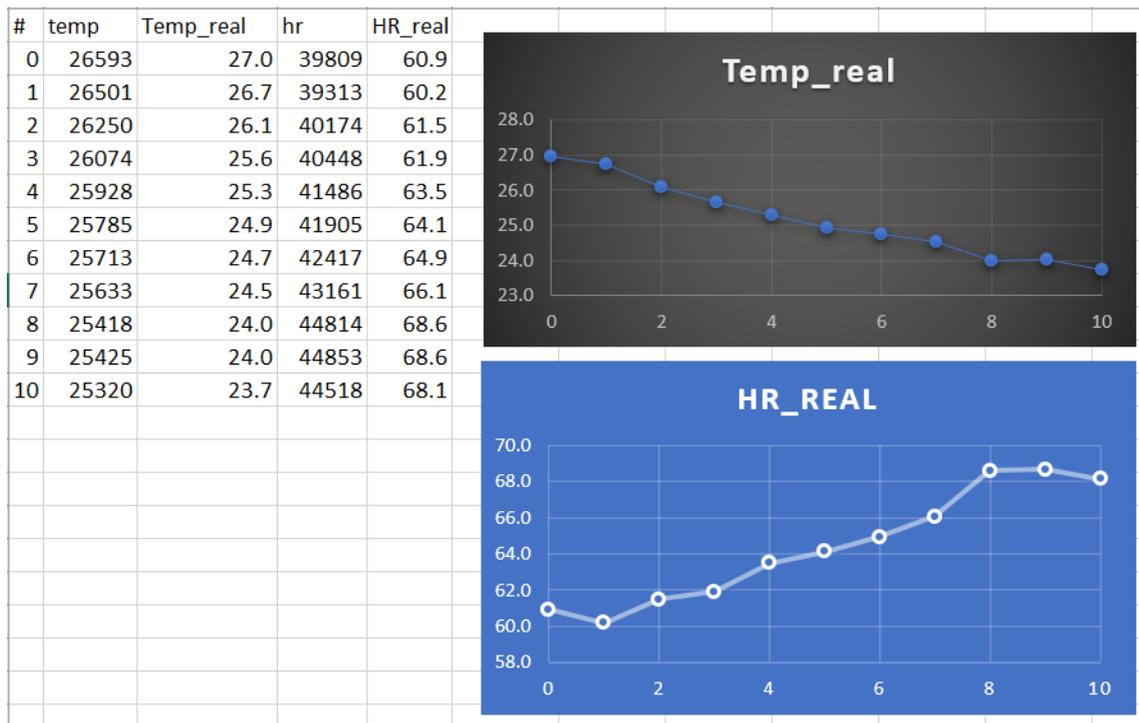


FIGURA 5.6: Historial de datos de temperatura del nodo N2 obtenido de la EEPROM. Estas gráficas se obtuvieron en Microsoft Excel a partir de un formato *.csv dado por Realterm en su opción de captura de datos. En los gráficos, el eje x representa el número de muestra y el eje y, el valor de cada parámetro ambiental.

requeriría añadir más nodos a esta WSN, se debe actualizar una suscripción de pago en Ubidots y registrar los nuevos dispositivos dentro del firmware del microcontrolador.

Cabe resaltar que la experiencia de usuario al momento de obtener los datos de la EEPROM puede ser algo complicada para algunos usuarios. Se debe realizar una serie de pasos descritos en la sección 4.3.2 de tal forma que se pueda obtener lo mostrado en la Figura 5.6. Estos datos son los que se guardan con base en el tiempo de muestreo del sistema. De esta forma, se puede calcular el tiempo aproximado de toma de datos continuos basado en un tiempo de muestreo de 30 minutos. Esto se observa en la Tabla 5.5. De la misma forma, el gateway guarda en la EEPROM los datos que no pueda enviar a la plataforma online (por fallas o inexistencia de conectividad). El alcance de la EEPROM (tiempo en el cual la EEPROM ya está llena) en el gateway considerando los dos nodos y

TABLA 5.5: Alcance de la EEPROM para el guardado de datos en nodos.

Tamaño total (kB)	Tamaño muestra (B)	# muestras	Alcance (días)
256	16	16384	341

TABLA 5.6: Alcance de la EEPROM para el guardado de datos en el gateway.

Tamaño total (kB)	Tamaño muestra (B)	# nodos	# muestras	Alcance (días)
256	16	2	8192	171

un tiempo de muestreo de 30 minutos se observa en la Tabla 5.6

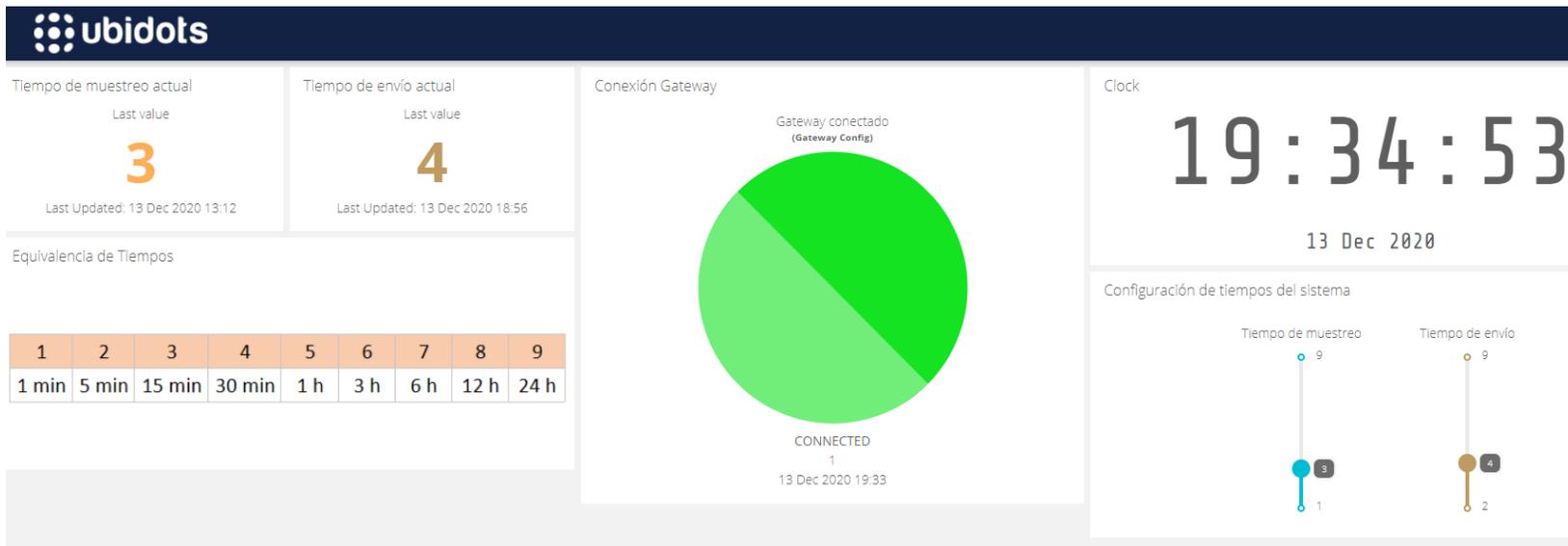


FIGURA 5.7: *Dashboard* de configuración

Este *dashboard* permite la configuración de tiempos de muestreo y envío a través de los *widgets* deslizadores que se encuentran a la derecha; y permite conocer el estado de conexión exitosa del gateway a través del indicador verde ubicado en medio de la imagen. Los *widgets* ubicados en la izquierda son indicadores de los valores actuales de los tiempos de muestreo y envío y donde se muestra también su equivalencia en minutos y horas.

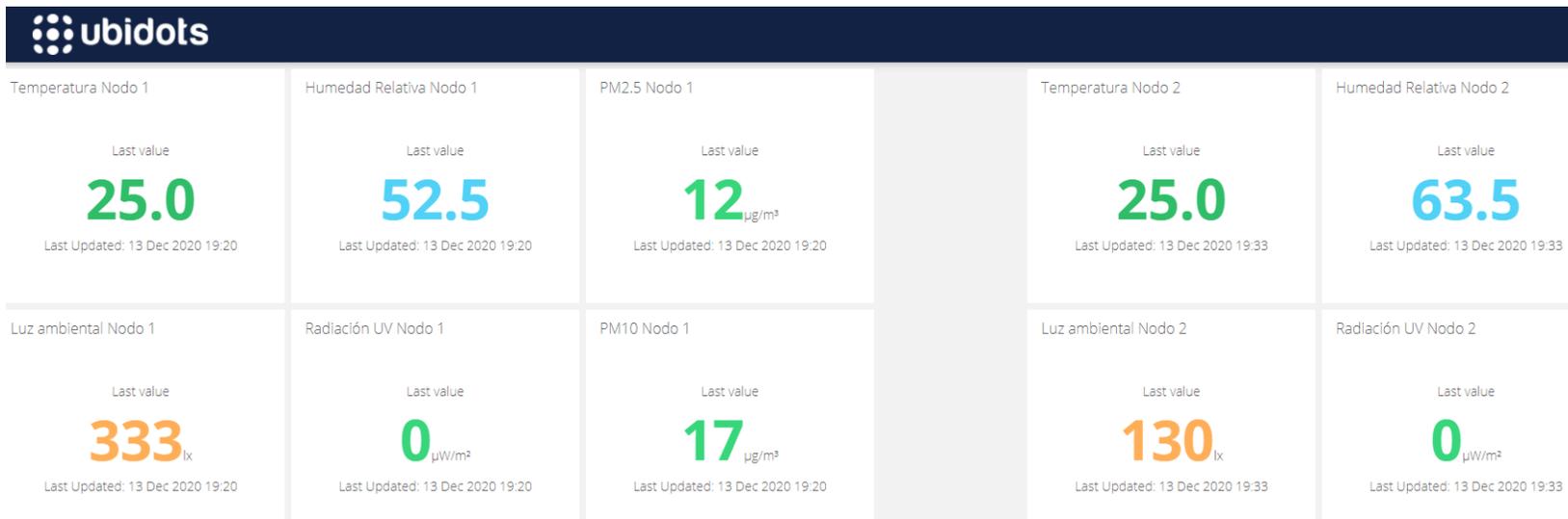


FIGURA 5.8: *Dashboard* de campo

Este *dashboard* permite la visualización de los valores de los parámetros medidos por los nodos. En la sección derecha de la figura se encuentran las variables correspondientes al nodo N1 y, a la izquierda, las variables correspondientes al nodo N2.

TABLA 5.7: Comparación entre las soluciones comerciales y el sistema desarrollado en este trabajo.

Dispositivos	Tipo de almacenamiento	Sensores					Volumen (cm ³)	Conectividad	WSN?	Capacidad de muestras	Baterías	Autonomía	Modular?
		T	HR	Luz	UV	MP							
Tinytag View 2	Local	x	x				204.75	Ninguna	no	30 mil	½AA 3.6V Litio	1 año	no
HOBO MX1104	Local	x	x	x			59.4	Bluetooth	no	1.9 millones	2 AAA 1.5 V Alcalinas	1 año	no
LASCAR EL-USB-2	Local	x	x				178.19	Ninguna	no	16 mil	2 AAA 1.5 V Alcalinas	3 años	no
TandD TR-72NW	Local y remoto	x	x				117.62	Ethernet	no	8 mil	2 AAA 1.5 V Alcalinas	6 meses	sí
Tinytag TR-3600	Remoto	x	x				229.41	Protocolo propietario	sí	no especifica	2 AA Alcalina (LR6)	12 meses	no
Testo 160 E	Local y remoto	x	x	x			107	Wi-Fi	no	32 mil	4 AAA 1.5 V Alcalinas	18 meses	sí
Propio	Local y remoto	x	x	x	x	x	119.81	BLE, Wi-Fi y GPRS	sí	16 mil	4 AAA 1.5 V Alcalinas	8 meses	sí

La tabla muestra una comparación con tres dispositivos de almacenamiento local, tres dispositivos de almacenamiento remoto y el sistema desarrollado en este trabajo. Se muestra la capacidad del dispositivo de contener a los sensores de temperatura (T), humedad relativa (HR), luz ambiental, UV y material particulado (MP). También se detalla si el dispositivo puede ser parte de una WSN o no. La capacidad de muestras representa la cantidad de datos que pueden ser almacenados en la memoria interna del dispositivo. Además, se detalla si el dispositivo es modular o no.

CONCLUSIONES

Este trabajo de tesis se desarrolló como solución directa al problema planteado en el capítulo 1 y con base en los requerimientos de diseño dados a partir de dicho problema. Además, la metodología descrita en el capítulo 4 permitió realizar un proceso ordenado de diseño e implementación, pues se dividió en las secciones más relevantes del sistema como lo son el hardware, software y las redes inalámbricas. A partir de esto, se pudo concluir con lo descrito a continuación.

En primer lugar, se obtuvo un sistema basado en un hardware modular con un volumen máximo de 119.81 cm³, el cual representa un 20.12 % menos de lo que se había dado como requerimiento (150 cm³). Esto permitió su ubicación sin perturbar la visualización de la exposición o localización de los objetos patrimoniales.

En segundo lugar, en cuanto a la autonomía energética, la comparación con el requerimiento debe darse con el resultado más crítico, en este caso la autonomía del nodo N1, el cual es de 8 meses para un tiempo de muestreo y envío de 30 minutos. Este resultado representa un 33.33 % más de lo que se había dado como requerimiento (6 meses). Esto permite que el sistema pueda monitorizar las condiciones ambientales por un periodo largo de tiempo sin necesitar mantenimiento.

En tercer lugar, la medición de hasta seis parámetros ambientales diferentes, sin aumentar el volumen máximo permitido del hardware, permite el uso de este mismo sistema en la medición ambiental de distintos tipos objetos patrimoniales compuestos de

diferentes materiales. Además, dado que el hardware es modular, permite el ahorro de costos cuando se desea medir uno o dos parámetros ambientales.

En cuarto lugar, la conectividad wifi respaldada por GPRS permitió el funcionamiento continuo y envío de datos hacia internet sin depender de la calidad de la cobertura wifi existente en un espacio determinado. Sin embargo, es necesario resaltar que la ubicación de los dispositivos dentro de un espacio debe ser determinado, de forma estratégica, en los lugares donde se pueda tener una conexión exitosa entre ellos, pues, como lo visto en la sección 5.2.1, si el espacio a medir se encuentra con elementos obstaculizadores, la conexión inalámbrica puede no llegar a darse debido al diseño tecnológico propio de BLE.

En quinto lugar, la tabla 5.7 muestra la comparación entre los dispositivos comerciales y el sistema desarrollado en este trabajo. Esta tabla considera los aspectos de diseño involucrados en el desarrollo como: volumen, autonomía, conectividad y cantidad del set de sensores. Se puede observar que se toman las mejores características de cada dispositivo y se combinan resultando en el sistema desarrollado en este trabajo, como por ejemplo:

- Este sistema sí cuenta con un set completo de sensores que pueden ser usados modularmente.
- El volumen es aproximadamente el promedio de los volúmenes de los otros dispositivos y, en algunos casos, es incluso menor a los volúmenes de dispositivos de almacenamiento local
- Este sistema cuenta con mayor número de tecnologías para conectividad inalámbrica tanto en la red interna de la WSN como la red para conectividad a internet.
- El número de muestras que puede almacenar es similar a los dispositivos de almacenamiento local.

- el tipo de baterías usadas son las usadas comúnmente en este tipo de dispositivos.
- La autonomía, aunque es uno de los de menor tiempo, es suficiente para los requerimientos mínimos de intervalos de muestreo necesarios.

Finalmente, se han considerado distintos puntos a mejorar y que se esperan desarrollar en un futuro. Algunos de estos puntos no han sido tratados por exceder el alcance de este trabajo o porque son continuación de los resultados obtenidos en esta tesis.

- Calibración de sensores para los módulos que hayan sido utilizados por un periodo prolongado de tiempo y de los cuales sus lecturas tengan un error considerable.
- Utilizar módulos de radiofrecuencia de mayor alcance y penetración de obstáculos. Estos módulos podrían ser de una frecuencia más baja a la usada en esta tesis (433 MHz, por ejemplo) y con una modulación que no permita perder la autonomía energética mínima.
- Emplear repetidores de señal para la interconexión entre nodos y gateways. Esto permitiría obtener un mayor alcance en distintas direcciones, lo que facilitaría la determinación de la ubicación de los módulos y posibilitaría, por ejemplo, usar un solo gateway en un museo entero.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ministerio de Cultura, *¿Qué es patrimonio cultural?* San Borja, Lima: Ministerio de Cultura del Perú.
- [2] J. L. P. J. C. A. S. Michalski, *Guía de Gestión de Riesgos para el Patrimonio Museológico*. Mexico: IBERMUSEOS, ICCROM-CCI, 2017.
- [3] M. García Morales, *La conservación preventiva en los museos. Teoría y Práctica*. Organismo Autónomo Museos y Centros, 2000.
- [4] H. Stovel, *Monitoring world heritage*. Vicenza - Italy: UNESCO World Heritage Centre and ICCROM, 2004.
- [5] TV-4501 — Temperature RH data logger — Tinytag View 2. (s. f.). [geminidataloggers.com](https://www.geminidataloggers.com). Recuperado 18 de octubre de 2022, de <https://www.geminidataloggers.com/data-loggers/tinytag-view-2/tv-4501>.
- [6] HOBO Analog/Temp/RH/Light Data Logger MX1104 — Onset Data Loggers. (s. f.). Recuperado 18 de octubre de 2022, de <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/mx1104>.
- [7] Lascar Electronics. (s.f.). Temperature and Humidity Data Logger - EL-USB-2. Recuperado 18 de octubre de 2022, de <https://www.lascarelectronics.com/easylog-el-usb-2>.
- [8] Ministerio de Cultura del Perú, “Programa presupuestal: Puesta en valor y en uso social del patrimonio cultural,” enero 2017.

- [9] TR-72nw Ethernet Temperature Humidity Data Logger - CAS. (2022, 6 julio). CAS Dataloggers. Recuperado 18 de octubre de 2022, de <https://dataloggerinc.com/product/tr-72nw-ethernet-temperature-humidity-data-logger/>.
- [10] TR-3600 — Temperature/RH data logger — Tinytag Ultra Radio. (s. f.). geminidataloggers.com. Recuperado 18 de octubre de 2022, de <https://www.geminidataloggers.com/data-loggers/tinytag-ultra-radio/tr-3600>.
- [11] Data logger Wi-Fi multiparámetro testo 160 E — Luz — Construcción y edificación - nivel de confort — Construcción y edificación — Aplicaciones — Instrumentos Testo S.A. (s. f.). Recuperado 18 de octubre de 2022, de <https://www.testo.com/es-ES/data-logger-wi-fi-testo-160-e/p/0572-2022>.
- [12] Ministerio de Cultura. (2011). Atlas de infraestructura y patrimoniocultural de las Americas. Peru.
- [13] Tse, Rita Aguiari, Davide Chou, Ka-Seng Su-Kit, Tang Giusto, Daniele Pau, Giovanni. (2018). Monitoring cultural heritage buildings via low-cost edge computing/sensing platforms: the Biblioteca Joanina de Coimbra case study. 148-152. 10.1145/3284869.3284876.
- [14] G. Alsuhly and A. Khattab. An IoT Monitoring and Control Platform for Museum Content Conservation. 2018 International Conference on Computer and Applications (ICCA), Beirut, 2018, pp. 196-201, doi: 10.1109/COMAPP.2018.8460402.
- [15] Tse, R.; Im, M.; Tang, S.; Menezes, L.; Dias, A. and Pau, G. (2020). Self-adaptive Sensing IoT Platform for Conserving Historic Buildings and Collections in Museums. In Proceedings of the 5th International Conference on Internet of Things, Big Data and Security - Volume 1: IoTBDS, ISBN 978-989-758-426-8, pages 392-398. DOI: 10.5220/0009470203920398.

- [16] J. Shah and B. Mishra. Customized IoT enabled Wireless Sensing and Monitoring Platform for preservation of artwork in heritage buildings. 2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), Chennai, 2016, pp. 361-366, doi: 10.1109/WiSPNET.2016.7566156.
- [17] L. M. R. Rodríguez Peralta, B. A. Ieixeira Gouveia, D. J. Gomes de Sousa and C. da Silva Alves. Enabling museum's environmental monitorization based on low-cost WSNs. 2010 10th Annual International Conference on New Technologies of Distributed Systems (NOTERE), Tozeur, 2010, pp. 227-234, doi: 10.1109/NOTERE.2010.5536677.
- [18] A. Al-Habal and A. Khattab, "Ultra-Low Power Layered IoT Platform for Museum Content Conservation," 2019 31st International Conference on Microelectronics (ICM), Cairo, Egypt, 2019, pp. 86-89, doi: 10.1109/ICM48031.2019.9021866.
- [19] Eltresy, N.A.; Dardeer, O.M.; Al-Habal, A.; Elhariri, E.; Hassan, A.H.; Khattab, A.; Elsheakh, D.N.; Taie, S.A.; Mostafa, H.; Elsadek, H.A.; Abdallah, E.A. RF Energy Harvesting IoT System for Museum Ambience Control with Deep Learning. *Sensors* 2019, 19, 4465.
- [20] Y. Zhang and W. Ye. Design and placement of light monitoring system in museums based on wireless sensor networks. 2011 International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (ADCONIP), Hangzhou, 2011, pp. 512-517.
- [21] F. Viani, F. Robol, E. Giarola, A. Polo, A. Massa and A. Toscano, "Wireless monitoring of heterogeneous parameters in complex museum scenario," 2014 IEEE Conference on Antenna Measurements Applications (CAMA), Antibes Juan-les-Pins, 2014, pp. 1-3, doi: 10.1109/CAMA.2014.7003437.
- [22] F. Viani, M. Salucci, P. Rocca, G. Oliveri and A. Massa, "A multi-sensor WSN backbone for museum monitoring and surveillance," 2012 6th European Conference on

Antennas and Propagation (EUCAP), Prague, 2012, pp. 51-52, doi: 10.1109/Eu-CAP.2012.6206050.

- [23] Z. Liu, M. Wang, S. Qi and C. Yang, "Study on the Anti-Theft Technology of Museum Cultural Relics Based on Internet of Things", in IEEE Access, vol. 7, pp. 111387-111395, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2933236.
- [24] M.A. Matin and M.M. Islam (September 6th 2012). Overview of Wireless Sensor Network, Wireless Sensor Networks - Technology and Protocols, Mohammad A. Matin, IntechOpen, DOI: 10.5772/49376. [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/books/wireless-sensor-networks-technology-and-protocols/overview-of-wireless-sensor-network>
- [25] Buratti, Chiara Conti, Andrea Dardari, Davide Verdone, R.. (2009). An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution. Sensors (Basel, Switzerland). 9. 6869-96. 10.3390/s90906869.
- [26] Gifford, I. (2020). IEEE 802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs). Recuperado el 25 October 2020. [Online]. Available: <http://ieee802.org/15/index.html>
- [27] IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. (2020). Recuperado el julio 22, 2020. [Online]. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html
- [28] Plan Nacional de Atribución de Frecuencias PNAF. Portal.mtc.gob.pe. (2020). Recuperado el 23 julio 2020. [Online]. Available: https://portal.mtc.gob.pe/comunicaciones/autorizaciones/servicios_privados/documentos/pnaf_act_feb08.pdf
- [29] Zigbee - Zigbee Alliance. Zigbee Alliance. (2020). Recuperado el 23 julio 2020. [Online]. Available: <https://zigbeealliance.org/solution/zigbee/>

- [30] Bluetooth Alliance. (2020). Recuperado el 23 julio 2020. [Online]. Available: <https://www.bluetooth.com/>
- [31] Discover Wi-Fi — Wi-Fi Alliance. Wi-fi.org. (2020). Recuperado el 23 julio 2020. [Online]. Available: <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi>.
- [32] IEEE 802.11 Working Group. Ieee802.org. (2020). Recuperado el 23 julio 2020. [Online]. Available: <https://www.ieee802.org/11/>

ANEXOS

Los archivos de diseño, modelos 3D y códigos fuente pueden ser encontrados en la siguiente repositorio en línea: *Repositorio Tesis Adrian Hinostroza*. Siguiendo el enlace se pueden encontrar tres carpetas con contenidos de distinto interés.

- **Documentos:** En esta carpeta se encuentra la documentación general usada para el desarrollo de la tesis. Se hallan hojas técnicas de cada sensor, módulo inalámbrico, microcontroladores y otros circuitos integrados usados y propuestos para el desarrollo de este trabajo.
- **Firmware:** En esta carpeta se encuentran los códigos fuente para la programación y desarrollo del firmware del microcontrolador.
- **Hardware:** Aquí podemos encontrar los archivos de diseño y producción de las placas de circuito impreso (PCB) desarrollados en esta tesis.
- **Mecánica:** En esta carpeta se encuentran los archivos STL de las impresiones 3D para las carcasas de los dispositivos desarrollados.