

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones

Diseño e Implementación de un Protocolo de Capa de Aplicación para la Transmisión de Datos Hidrometeorológicos utilizando LoRaWAN: Caso de Estudio PROMAS.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Autores:

Pedro Hernán Ulloa Salamea

Jorge Luis Veloz Sigüencia

Director:

Darwin Fabián Astudillo Salinas

ORCID: 0000-0001-7644-0270

Cuenca, Ecuador

2023-06-29

Resumen

El trabajo de titulación "Diseño e Implementación de un Protocolo de Capa de Aplicación para la Transmisión de Datos Hidrometeorológicos utilizando Long Range Wide Area Network (LoRaWAN): Caso de Estudio PROMAS. utiliza la tecnología de largo alcance y bajo consumo de energía Long Range (LoRa) como una aplicación de WSN. LoRa opera bajo el protocolo LoRaWAN desarrollado por LoRa Alliance, diseñado para dispositivos finales basados en baterías. Estos dispositivos se conectan al servidor central a través de un Gateway en una topología de estrella-estrella. Tanto LoRa como LoRaWAN ofrecen soluciones en el contexto del Internet of Things (IoT) y facilitan la implementación de sistemas de monitoreo en entornos rurales debido a su sencilla configuración, bajo consumo energético y cobertura de largo alcance. Dado que el enfoque principal de este trabajo es monitorear una zona remota y de difícil acceso con conexiones a Internet de baja velocidad, el Gateway utiliza la tecnología Global System for Mobile (GSM)/General Packet Radio Service (GPRS) para transmitir los datos al servidor. GSM se considera un estándar de segunda generación (2G) y GPRS, una tecnología 2.5G que mejora el sistema GSM. El objetivo principal de este trabajo es la implementación del protocolo de capa de aplicación Variable Meteorological Transmission Protocol Version 2 (VMTPv2), diseñado específicamente para funcionar sobre LoRaWAN. Este protocolo se ejecuta entre los nodos sensores y el servidor, y su objetivo es ajustar la carga útil en función de la información meteorológica transportada, para minimizar el tamaño de la trama y reducir el consumo energético total del sistema.

Palabras clave: Wireless Sensor Network (WSN), LoRaWAN, VMTPv2, protocolo, consumo energético



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

The graduation project "Design and Implementation of an Application Layer Protocol for the Transmission of Hydrometeorological Data using LoRaWAN: PROMAS Case Study." It uses the long range and low power consumption LoRa technology as a WSN application. LoRa operates under the LoRaWAN protocol developed by the LoRa Alliance, and was designed for battery-based end devices. These devices connect to the central server through a Gateway in a star-star topology. Both LoRa and LoRaWAN offer solutions in the context of IoT and facilitate the implementation of monitoring systems in rural environments due to their easy configuration, low power consumption and long-range coverage. Since the main focus of this work is to monitor a remote and hard-to-reach area with low-speed Internet connections, the Gateway uses GSM/GPRS technology to transmit the data to the server. GSM is considered a second generation (2G) standard and GPRS, a 2.5G technology that enhances the GSM system. The main objective of this work is the implementation of the application layer protocol VMTPv2, designed specifically to work on LoRaWAN. This protocol runs between the sensor nodes and the server, and its objective is to adjust the payload based on the weather information carried, to minimize the size of the frame and reduce the total energy consumption of the system.

Keywords: WSN, LoRaWAN, VMTPv2, protocol, energy consumption



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de Contenidos

1. Introducción	18
1.1. Definición del problema	18
1.2. Justificación	19
1.3. Alcance de la propuesta	19
1.4. Objetivos generales y específicos	20
1.4.1. Objetivo general	20
1.4.2. Objetivos específicos	20
2. Fundamentos teóricos	21
2.1. Red de sensores inalámbricos (WSN)	21
2.2. Red de área amplia de baja potencia (LPWAN)	22
2.3. Long range (LoRa)	23
2.4. LoRaWAN	24
2.5. Cayenne LPP	25
2.6. Variable Meteorological Transmission Protocol (VMTPv1)	25
2.7. Hardware	26
2.7.1. Módulo LoPy4	26
2.7.2. Módulo GSM/GPRS SIM800L	27
2.7.3. Sensor Davis 6490	28
2.7.4. Sensor Davis 6463	28
2.7.5. Sensor Davis 6440	28
2.7.6. Sensor DS18B20	29
2.7.7. Sensor SHT11	29
2.7.8. Sensor DHT22	30
2.8. ThingsBoard	30
2.9. Atom	32
3. Estado del arte y trabajos relacionados	33
4. Diseño e implementación	40
4.1. Metodología	40
4.2. Ajuste del sistema	42

4.2.1. Firmware	42
4.2.2. Puesta a punto del hardware	42
4.2.3. RTC	42
4.2.4. Implementación del programa de línea base	43
4.3. Arquitectura de la red	44
4.3.1. Nodos sensores	44
4.3.2. Gateway	46
4.3.3. Servidor	47
4.3.4. Conectividad	48
4.4. Dispositivos	50
4.4.1. Gateway	50
4.4.2. Nodos	50
4.5. Diseño del protocolo	52
4.5.1. Codificación	55
4.5.2. Decodificación	59
4.6. Conclusiones	61
5. Resultados y discusión	62
5.1. Transmisión	62
5.2. Configuración de la red a una frecuencia de 433Mhz	63
5.3. Comparación de protocolos con respecto al número de bytes transmitidos	65
5.4. Consumo de datos de la tarjeta Subscriber Identity Module (SIM)	66
5.5. Consumo energético	67
5.5.1. Nodo Nivel de Agua	68
5.5.2. Nodo multiparamétrico	69
5.5.3. Gateway	71
5.5.4. Estimación del consumo energético	73
5.5.5. Consumo de energía de los diferentes protocolos	75
5.6. Conclusiones	77
6. Conclusiones y recomendaciones	79
6.1. Conclusiones	79
6.2. Recomendaciones	81

6.3. Trabajos futuros	82
Referencias	83
Anexos	
A. Anexo A: Configuración de dispositivos	88
A.1. Instalación y configuración del servidor LoRaWAN TTN	88
A.1.1. Instalación	88
A.1.2. Configuración del servidor	89
A.2. Creación y configuración del gateway	91
A.3. Configuración de la aplicación y de los nodos en el servidor TTN	93
A.3.1. Configuración de aplicación	93
A.3.2. Configuración de los nodos en el servidor TTN	93
B. Anexo B: Desarrollo de la aplicación en el servidor	97
B.1. Descripción de la aplicación	97
B.2. Decodificación de la carga útil de las variables meteorológicas	97
B.2.1. Función para decodificar las variables meteorológicas del nodo nivel de agua	98
B.2.2. Función para decodificar las variables meteorológicas del nodo multiparamétrico	99
C. Anexo C: Configuración de la aplicación Thingsboard	100
C.1. Configuraciones previas para enlazar servidor TTN con Thingsboard	100
C.2. Cadena de reglas para la visualización de las variables meteorológicas	102
D. Anexo D: Características del hardware	104
D.1. Módulo LoPy4	104
E. Anexo E: Perfiles topográficos de las pruebas de transmisión	107
E.1. Transmisión a una distancia de 200m	107
E.2. Transmisión a una distancia de 500m	107
E.3. Transmisión a una distancia de 1000m	107
E.4. Transmisión a una distancia de 1400m	108

E.5. Transmisión a una distancia de 2000m 109

E.6. Transmisión a una distancia de 2500m 110

E.7. Transmisión a una distancia de 3000m 110

E.8. Transmisión a una distancia de 3500m 110

Índice de figuras

1.1. Topología General del Sistema de Comunicación	20
2.1. Arquitectura de una WSN.	21
2.2. Ancho de Banda vs Espectro de LoRa, Ble, WiFi y la red celular.	23
2.3. LoRa y LoRaWAN.	24
2.4. Modelo de la trama normal del protocolo VMTPv1	26
2.5. Modelo de la trama corta del protocolo VMTPv1	26
2.6. Placa de Desarrollo LoPy4.	27
2.7. Módulo GSM/GPRS SIM800L.	27
2.8. Sensor Davis 6490.	28
2.9. Sensor Davis 6463.	29
2.10. Sensor Davis 6440.	29
2.11. Sensor DS18b20.	30
2.12. Sensor SHT11.	30
2.13. Sensor DHT22.	31
2.14. Plataforma ThingsBoard.	31
2.15. Editor de texto Atom.	32
3.1. Esquema General del Sistema Completo de Transmisión	35
4.1. Pasos a seguir para la implementación.	40
4.2. Diagrama funcional del sistema.	41
4.3. Arquitectura de red.	44
4.4. Comunicación entre nodo y Gateway.	45
4.5. Configuración del Gateway.	46
4.6. Interfaz del servidor.	48
4.7. Integración del servidor TTN y ThingsBoard.	48
4.8. Diagrama de Flujo para sincronización con el servidor NTP.	49
4.9. Interfaz de ThingsBoard.	50
4.10. Dispositivos que conforman el Gateway.	51
4.11. Dispositivos que conforman el nodo multiparamétrico.	52
4.12. Dispositivos que conforman el nodo de nivel de agua.	53

4.13. Trama de datalogger de nivel de agua	54
4.14. Trama del primer mensaje del datalogger multiparamétrico	55
4.15. Trama del segundo mensaje del datalogger multiparamétrico	55
4.16. Trama final de los nodos con cifrado AES-128.	56
5.1. Topografía de la zona.	63
5.2. Niveles de Received Signal Strength Indicator (RSSI) con intervalo de confianza del 95 % de confiabilidad.	64
5.3. Total de bytes enviados usando los protocolos: Cayenne, Línea base, VMTPv1 y VMTPv2 (AES-128) desde el nodo multiparamétrico durante 1 día.	65
5.4. Total de bytes enviados usando los protocolos: Cayenne, Línea base, VMTPv1 y VMTPv2 (AES-128) desde el nodo nivel de agua durante 1 día.	66
5.5. Montaje realizado para medir la corriente instantánea.	67
5.6. Niveles de corriente en encendido y sincronización del nodo nivel de agua.	68
5.7. Niveles de corriente en modo deep sleep y captura de datos del nodo nivel de agua.	69
5.8. Niveles de corriente en el envío de datos del nodo nivel de agua.	70
5.9. Niveles de corriente en encendido y sincronización del nodo multiparamétrico.	70
5.10. Niveles de corriente en modo sleep y captura de datos del nodo multiparamétrico.	71
5.11. Niveles de Corriente en el envío de datos del nodo multiparamétrico.	72
5.12. Niveles de corriente en encendido y sincronización del Gateway	72
5.13. Niveles de Corriente en la recepción de mensajes del gateway	73
5.14. Estimación de tiempo de vida de la batería Amperaje vs Horas.	74
5.15. Estimación de tiempo de vida de la batería Voltaje vs Horas.	75
5.16. Consumo de energía de los diferentes protocolos (nodo nivel de agua)	76
5.17. Consumo de energía de los diferentes protocolos (nodo multiparamétrico)	76
5.18. Consumo de energía de los diferentes protocolos (Gateway)	77

A.1. Modificación del archivo de configuración docker-compose.yml	89
A.2. Modificación del archivo de configuración ttn-lw-stack-dcoker.yml	90
A.3. Página de Bienvenida del Servidor The Things Stack	91
A.4. Creación del Gateway en el Servidor The Things Network.	92
A.5. Configuración del gateway.	92
A.6. Creación de la aplicación en TTN.	93
A.7. Configuración de la aplicación en TTN.	93
A.8. Creación de Dispositivos finales en el servidor TTN	94
A.9. Configuración de los nodos finales en el servidor TTN parte 1.	95
A.10. Configuración de los nodos finales en el servidor TTN parte 2.	96
B.1. Ventana de la aplicación del servidor The-Thing-Stack.	97
B.2. Diagrama de Flujo: Decodificación de Variables Meteorológicas de nodo Nivel de Agua.	98
B.3. Diagrama de Flujo: Decodificación de Variables Meteorológicas de nodo Pluviómetro.	99
C.1. Creación de Dispositivo en Thingsboard.	100
C.2. Creación de enlace Webhook desde TTN.	101
C.3. Modificación de Webhook para el enlace de comunicación entre TTN y ThingsBoard.	101
C.4. Simulación de conexión de enlace desde TTN.	102
C.5. Revisión de llegada de mensaje Simulado en ThingsBoard.	102
C.6. Cadena de Reglas de ThingsBoard para observar las variables meteo- rológicas.	103
E.1. Prueba de transmisión a 200m.	107
E.2. Prueba de transmisión a 500m.	108
E.3. Prueba de transmisión a 1000m.	108
E.4. Prueba de transmisión a 1400m.	109
E.5. Prueba de transmisión a 2000m.	109
E.6. Prueba de transmisión a 2500m.	110
E.7. Prueba de transmisión a 3000m.	111
E.8. Prueba de transmisión a 3500m.	111

Índice de tablas

2.1. Tecnologías LPWAN más utilizadas.	22
4.1. Definición de la trama.	53
4.2. Tamaño de la variable temperatura.	56
4.3. Tamaño de la variable humedad.	57
4.4. Tamaño de la variable precipitación.	58
4.5. Tamaño de la variable Radiación UV.	58
4.6. Tamaño de la variable humedad del suelo.	59
4.7. Tamaño del mensaje del nodo Nivel de Agua.	60
4.8. Tamaño del primer mensaje del nodo Multiparamétrico.	60
4.9. Tamaño del segundo mensaje del nodo Multiparamétrico.	61
5.1. Valores del índice RSSI obtenidos en las distintas pruebas.	63
5.2. Consumo energético de los diferentes modos de operación, correspondiente a los nodos y Gateway	73

Agradecimientos

A nuestras familias, por apoyarnos incondicionalmente en este largo camino, sobre todo por inculcarnos los valores necesarios para crecer y progresar día a día. A todos los profesores, que con su conocimiento han despertado el gusto de la investigación y superación ciclo tras ciclo , pero especialmente al Ing. Fabián Astudillo, PhD por la dirección, apoyo y motivación para sacar adelante este proyecto. Al Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca, por permitirnos trabajar de la mano en el desarrollo de este protocolo; que estamos seguros les será de mucha ayuda y además por facilitarnos el uso de sus instrumentos e información.

Los Autores

Dedicatoria

Le dedico el resultado de este trabajo a toda mi familia. Principalmente a mi mamá, que tuvo la difícil tarea de criarnos ella sola a mi hermana y a mí. Con su ejemplo me ha demostrado lo que es el amor, valentía y fuerza, principios fundamentales que llevaré toda mi vida. A mi papá y a mi segunda madre, mi abuelita Memena; que desde el cielo me guían en cada paso que doy. A mi hermana y a mi tío Alfonso, que me apoyaron y contuvieron en todo este proceso. A mis primos Xavier y Pablo, que me han acompañado en este largo camino con sus conocimientos, y por motivarme a seguir hacia adelante.

También quiero dedicar este trabajo a Andrea, que fue una persona muy especial e importante para mí en gran parte de este recorrido. Su afecto y cariño, fueron un pilar fundamental para no decaer cuando todo parecía complicado e imposible.

A todos mis amigos y amigas, principalmente a Hugo y Manuel. Sin su apoyo y presencia, este trayecto hubiera sido más difícil de lo fue.

Por último y no menos importante, le quiero dedicar este trabajo a Leo Messi, con su ejemplo de resiliencia, perseverancia y superación, me ha inspirado a cumplir con todo lo que me proponga, y a tener presente que en la vida hay cosas que tardan en llegar, pero al final, hay recompensa.

Pedro Hernán Ulloa Salamea

Dedicatoria

El presente trabajo de titulación, le dedico a mis padres Luis y María, que han sido el soporte fundamental en mi vida. Los mismos que me han enseñado que la perseverancia y el trabajo duro tienen su fruto, además de mostrarme el amor infinito que tiene Dios. A mi hermano, que siempre ha estado y me ha apoyado en todos los momentos de mi vida. A mis abuelos que están en el cielo y a mis abuelitas, que siempre estuvieron conmigo y me daban ánimos para no desistir.

También quiero dedicar este trabajo a Paola, que con su cariño y comprensión me dio ánimos para culminar de manera correcta esta etapa de la vida. Finalmente, a mis amigos y a Sebastián, que siempre han sido un apoyo a lo largo de este difícil trayecto.

Jorge Luis Veloz Siguenca

Abreviaciones y acrónimos

- ABP** Activation by Personalization. 44, 45, 47, 59, 94
- ADC** Analog to Digital Converter. 104, 105
- AES-128** Advanced Encryption Standard 128. 48, 55, 59
- BLE** Bluetooth Low Energy. 23, 26, 104
- CPU** Central Processing Unit. 104
- CSS** Chirp Spread Spectrum modulation. 23
- DCS** Digital Control System. 27
- DMA** Direct Memory Access. 105
- DR** Data Rate. 47, 54
- EGSM** Extended GSM. 27
- ESP32** Chipset Espressif 32. 20, 26, 104
- FSK** Frequency-Shift Keying. 23, 24
- GPRS** General Packet Radio Service. 2, 3, 19, 27, 34, 37, 44, 46–48, 50, 62, 73, 79
- GPS** Global Positioning System. 33
- gRPC** Remote Procedure Calls. 48
- GSM** Global System for Mobile. 2, 3, 19, 27, 34, 44, 46–48, 50, 62, 66, 73, 79
- INAMHI** Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. 56–58
- INIAP** Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. 58
- IoT** Internet of Things. 2, 3, 22, 26, 30, 31, 37, 48
- IP** Internet Protocol. 24, 46, 49, 91
- IPv6** Internet Protocol Version 6. 104

ISM Industrial, Scientific and Medical. 23

LoRa Long Range. 2, 3, 18, 21, 23, 24, 26, 34–36, 38, 46, 47, 54, 55, 68, 69, 71, 72, 82, 104, 106

LoRaWAN Long Range Wide Area Network. 2, 3, 18–21, 24, 25, 34–38, 40, 41, 44, 45, 47, 48, 54, 60, 62, 79, 82, 94, 104

LPP Low Power Payload. 25, 48, 65, 66, 77, 78, 80, 81

LPWAN Low Power Wide Area Network. 21–23, 38

MAC Media Access Control. 91, 94

MQTT Message Queuing Telemetry Transport. 36

NTP Network Time Protocol. 47, 49

OPC OLE for Process Control. 36

OTAA Over The Air Activation. 36, 44, 47, 94

OTP One Time Password. 30

PCB Printed Circuit Board. 34, 35

PCS Personal Communications Service. 27

PROMAS Programa para el Manejo del Agua y del Suelo. 18–20, 33–35, 42, 43, 62

PWM Pulse Width Modulation. 105

RAM Random Access Memory. 105

RPC Remote Procedure Call. 31

RSSI Received Signal Strength Indicator. 9, 11, 36, 41, 62–64, 77, 81, 104, 107–110

RTC Real Time Clock. 35, 42, 50–52

SF Spreading Factor. 23, 36, 47

SIM Subscriber Identity Module. 5, 27, 47, 66, 67

- SNR** Signal to Noise Ratio. 36
- SSL** Secure Sockets Layer. 105
- TLS** Transport Layer Security. 105
- TTI** The Things Industries. 47
- TTN** The Things Network. 37, 41, 42, 46–48, 59–61
- TTS** The Things Stack. 47, 88, 89
- UDP** User Datagram Protocol. 46, 49
- ULP** Ultra Low Power. 104
- UV** Ultra Violeta. 28, 51, 58
- VMTP** Variable Meteorological Transmission Protocol. 34
- VMTPv1** Variable Meteorological Transmission Protocol. 4, 8, 18, 25, 26, 65, 66, 75–78, 80, 81
- VMTPv2** Variable Meteorological Transmission Protocol Version 2. 2, 3, 19, 40, 41, 45, 52, 54, 56, 57, 59, 62, 65, 67, 75–78, 80
- WiFi** Wireless Fidelity. 23, 26, 33, 104, 106
- WPA** Wi-Fi Protected Access. 105
- WSN** Wireless Sensor Network. 2, 3, 19, 21, 22, 79, 81, 82

Introducción

1.1. Definición del problema

En los últimos años, el uso de estaciones hidrometeorológicas ha servido para la recolección y registro de distintas variables como temperatura, humedad, presión, velocidad, dirección del viento, etc. Estas variables son de gran ayuda para estudiar y comprender de mejor manera el comportamiento del clima. La mayor parte de estaciones hidrometeorológicas se encuentran en lugares de difícil acceso. Por esta razón, lo que se plantea comúnmente son sistemas de comunicación de datos para transmitir la información adquirida por las mismas [1].

El Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca, tiene como misión la investigación y contribución al manejo sostenible de recursos de agua y suelo, en la actualidad cuenta con alrededor de 130 estaciones hidrometeorológicas ubicadas en las provincias de Azuay y Cañar. En cada ubicación existen diferentes tipos de estaciones tales como: meteorológicas que son las encargadas de medir las variables del clima, estaciones hidrométricas que son las encargadas de medir el caudal de los ríos y todo lo referente con el agua. Durante el tiempo de operación de las estaciones, la descarga de información se ha realizado de manera manual, es decir, personal del PROMAS va al lugar a obtener los datos de los sensores.

Como punto de partida se utiliza el trabajo: “Diseño e implementación de un protocolo de capa de aplicación para la transmisión de datos hidrometeorológicos utilizando tecnología LoRa” [2], cuyo aporte principal es la implementación de una red de sensores que utiliza el protocolo transmisión de datos meteorológicos VMTPv1. El protocolo VMTPv1 mejora la transmisión de las variables al codificar los datos en la capa de aplicación LoRaWAN. Otra característica importante dentro de este trabajo es el consumo de batería, donde se obtiene una autonomía de la red de sensores de aproximadamente 45 días.

1.2. Justificación

La red de sensores inalámbricos o WSN dispone de una serie de dispositivos que se comunican entre sí, dentro de una área de estudio concreta. Las WSN son un campo de desarrollo amplio; en donde se generan diversos diseños y estudios de protocolos, además varias aplicaciones capaces de mejorar la comunicación entre los nodos (sensores); el objetivo es reducir costos y extender la vida útil de los mismos.

Dentro de este ámbito, el PROMAS posee una serie de estaciones que están a lo largo del Ecuador, las mismas que recogen variables meteorológicas e hidrológicas. En muchas de estas estaciones la obtención de los datos se realiza de forma manual, aumentando el riesgo de la pérdida de información por retención de memoria, vida útil de las baterías y el difícil acceso a los sensores.

Con el presente trabajo se pretende mejorar el prototipo de WSN del PROMAS, generando una red con una comunicación eficaz y optimizada en términos de energía. Todo esto mediante la creación de un nuevo protocolo de capa de aplicación, que mejore el funcionamiento de los nodos presentes en la red de sensores.

1.3. Alcance de la propuesta

Este trabajo se enfoca en el diseño de un protocolo de capa de aplicación VMTPv2. El cual permite la transmisión de los datos de cada nodo hacia un servidor principal para que estos sean visibles por cualquier persona. Este protocolo pretende reducir la cantidad de datos que forman parte de la trama, de esta manera se podría enviar una mayor cantidad de mediciones, aumentaría el tiempo de vida de los dispositivos y facilitaría el mantenimiento de la red de sensores.

A continuación, en la Figura 1.1 se muestra un esquema general del funcionamiento del sistema de comunicación. La comunicación entre nodos y Gateway utiliza LoRa-WAN. El Gateway reenvía los datos a un servidor en Internet mediante un módulo GSM/GPRS.

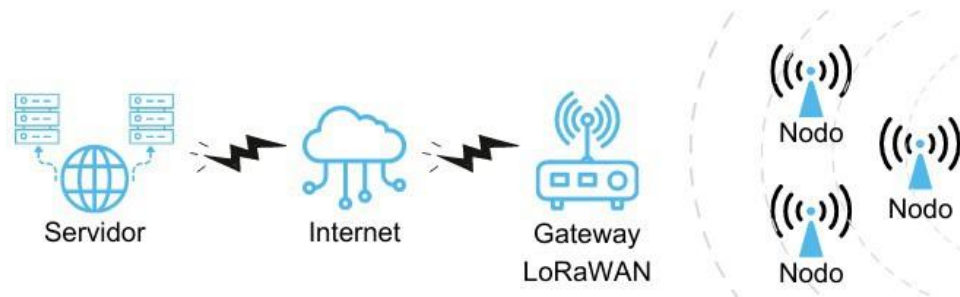


Figura 1.1: Topología General del Sistema de Comunicación

1.4. Objetivos generales y específicos

1.4.1. Objetivo general

- Diseño e implementación de un protocolo de capa de aplicación para la transmisión de datos hidrometeorológicos utilizando LoRaWAN: Caso de Estudio PROMAS.

1.4.2. Objetivos específicos

- Estudiar el estado del arte en relación a protocolos de capa de aplicación adaptados al tratamiento de datos hidro-meteorológicos.
- Diseñar un protocolo de capa de aplicación que permita reducir el tamaño de datos enviados, en función de variables hidro-meteorológicas requeridas por el PROMAS.
- Implementar el protocolo diseñado, tanto para el cliente y el servidor. Los dispositivos en los que se va a implementar son LoPy4 & Chipset Espressif 32 (ESP32) en el cliente, y ThingsBoard en el servidor.

Fundamentos teóricos

Este capítulo introduce los conceptos utilizados durante el desarrollo de este trabajo de titulación. La primera definición importante se detalla en la Sección 2.1, donde se mencionan aspectos generales de las redes de sensores inalámbricos (WSN). Por otra parte, en la Sección 2.2 se exponen ideas claves sobre una red de área amplia de baja potencia (Low Power Wide Area Network (LPWAN)). La Sección 2.3 y la 2.4 explican las características y el funcionamiento de la tecnología LoRa y su protocolo LoRaWAN. Finalmente, la Sección 2.7 describe de manera general los principales elementos a utilizar, como la placa de desarrollo LoPy4, la plataforma ThingsBoard y los distintos sensores que forman parte de esta implementación.

2.1. Red de sensores inalámbricos (WSN)

La integración de múltiples tipos de sensores con capacidades de detección y comunicación inalámbricas, dan lugar a una WSN. Además, son capaces de medir humedad, presión, intensidad de luz, temperatura, etc. de cualquier ambiente físico. Las WSN consisten en un nodo central (Gateway o nodo sumidero) y una gran cantidad de nodos sensores colocados en un área (campo de detección) como se muestra en la Figura 2.1. Los datos se transmiten desde los nodos al Gateway a través de una comunicación de un solo salto o de múltiples saltos y se envían al usuario a través de Internet [3].

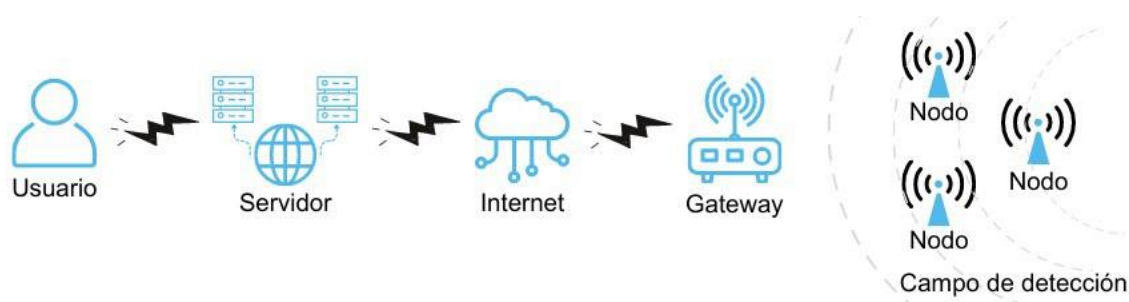


Figura 2.1: Arquitectura de una WSN.

Hay una gran cantidad de aplicaciones de WSN, por ejemplo: en el ámbito militar, monitoreo del medio ambiente, medicina y salud, industria, mundo inteligente, seguridad y emergencias, etc. Los nodos sensores en las WSN generalmente funcionan con baterías diminutas con energía limitada y es difícil recargarlas o reemplazarlas.

Por lo tanto, aumentar la eficiencia energética de las WSN y aumentar el tiempo de vida de la red son estudios de gran importancia [3].

2.2. Red de área amplia de baja potencia (LPWAN)

LPWAN describe una categoría de tecnologías de comunicación inalámbrica diseñadas para admitir implementaciones de Internet de las cosas (IoT). Las tecnologías LPWAN sirven a una amplia gama de industrias y admiten una variedad de aplicaciones y escenarios de implementación, para los cuales las tecnologías móviles existentes no son las más eficientes. El objetivo principal de estas redes consiste en ofrecer una mejor cobertura en áreas extensas, gran eficiencia energética, mayor escalabilidad, comunicaciones de bajo costo y consumo reducido del ancho de banda [4].

Las tecnologías de área amplia de baja potencia LPWAN, abren nuevas oportunidades de mercado al proporcionar conectividad IoT con optimización de energía, diferenciándose así de los protocolos inalámbricos móviles existentes o las tecnologías de corto alcance. Hasta la fecha, como LPWAN se ha convertido en uno de los mercados de más rápido crecimiento en IoT, han aparecido varias de estas tecnologías tanto en los espectros con licencia como sin licencia. Algunas de las tecnologías LPWAN más populares se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Tecnologías LPWAN más utilizadas.

Sin Licencia	Con Licencia
LoRa	NB-IoT
SigFox	LTE-M(LTE Cat-M1)
Symphony Link	NB-Fi (Narrowband Fidelity)
iFrogLab	LTE-MTC
ThingPark Wireless	UNB (Ultra Narrow Band)
Ingenu	WIUGHTLESS-P

2.3. Long range (LoRa)

LoRa es una tecnología de capa física para sistemas de comunicación inalámbrica de largo alcance y baja potencia desarrollada por Semtech. LoRa, entre otras tecnologías LPWAN como SigFox, es una de las tecnologías más prometedoras y ampliamente adoptadas. Su robustez a la interferencia y la cobertura de largo alcance son posibles gracias al uso de la modulación por desplazamiento de frecuencia (Frequency-Shift Keying (FSK)) M-aria (simétrica tanto para el enlace ascendente (UpLink) y para el enlace descendente (DownLink) y modulación por espectro ensanchado chirp (Chirp Spread Spectrum modulation (CSS)), una técnica en la que la señal se modula mediante pulsos chirp. Experimentos reales han mostrado que LoRa cubre más de 15 km en tierra y cerca de 30 km en el agua utilizando la banda Industrial, Scientific and Medical (ISM) de 868 MHz con una potencia de transmisión de 14 dBm y el factor de dispersión máximo (Spreading Factor (SF)). LoRa está disponible a través de proveedores de redes móviles de todo el mundo [5]. La Figura 2.2 muestra una comparación entre el ancho de banda y el rango de los espectros de Wireless Fidelity (WiFi) y Bluetooth Low Energy (BLE), Celular y LoRa.

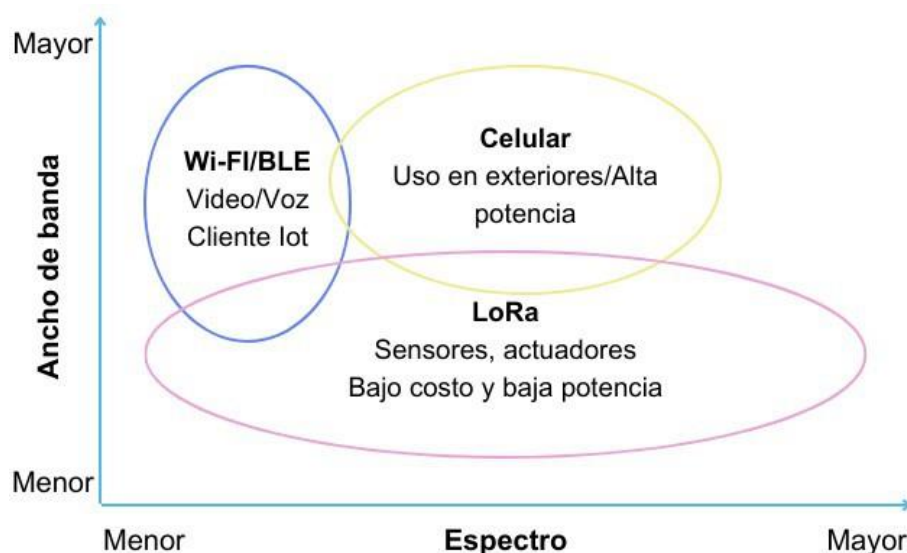


Figura 2.2: Ancho de Banda vs Espectro de LoRa, Ble, WiFi y la red celular. Como se

puede observar en la Figura 2.2, LoRa posee un mayor espectro en comparación a otras redes (WiFi y BLE, Celular), lo que da lugar a un incremento del rango de cobertura. Pero a la vez, esto genera un menor ancho de banda, por lo que esta

tecnología no se utiliza para comunicaciones multimedia, en donde este parámetro es importante dentro de la transmisión.

2.4. LoRaWAN

La tecnología LoRa opera bajo el protocolo LoRaWAN desarrollado por LoRa Alliance. LoRaWAN está diseñado para dispositivos finales basados en baterías. Los dispositivos finales están conectados al servidor de red central a través de una puerta de enlace (también llamada concentrador, estación base o Gateway) en una topología estrella. Los dispositivos finales se conectan a una o más puertas de enlace mediante comunicación LoRa o FSK de un solo salto, mientras que el Gateway y los servidores de red se conectan mediante conexiones estándar de Internet Protocol (IP) [5]. La Figura 2.3 muestra LoRa y su protocolo LoRaWAN.



Figura 2.3: LoRa y LoRaWAN.

En la Figura 2.3, se ilustran las tres clases de dispositivos finales que admite LoRaWAN, los cuales se describen a continuación:

- Clase A:** Permite que los dispositivos finales se comuniquen bidireccionalmente y es compatible con todos los dispositivos LoRaWAN. El funcionamiento de la Clase A requiere dispositivos finales de baja potencia. Además, poseen ventanas de recepción aleatorias en el Downlink e implementan ALOHA puro en el Uplink [5].

- **Clase B:** Los dispositivos finales de Clase B poseen ventanas de recepción a horas programadas, además de las ventanas de recepción aleatoria de Clase A. Las aplicaciones que requieren tráfico adicional en el Downlink, deben ejecutarse en esta clase de dispositivos [5].
- **Clase C:** Finalmente, los dispositivos finales de Clase C disponen de ventanas de recepción abiertas continuamente, excepto durante la transmisión [5].

2.5. Cayenne LPP

Cayenne Low Power Payload (Low Power Payload (LPP)) es un protocolo de comunicación diseñado para dispositivos IoT con limitaciones de energía y ancho de banda. Este protocolo permite transmitir datos de sensores y actuadores a largas distancias, con un consumo de ancho de banda y energía reducido. Además, Cayenne LPP es compatible con diferentes tecnologías inalámbricas, incluyendo LoRaWAN y Sigfox, lo que lo hace ideal para una amplia variedad de aplicaciones IoT. Con su enfoque en la eficiencia de recursos, Cayenne LPP es una excelente opción para proyectos que requieren una transmisión de datos confiable y eficiente en términos de energía [6].

2.6. VMTPv1

Variable Meteorological Transmission Protocol (VMTPv1) es un protocolo que se ejecuta sobre LoRaWAN y maneja variables meteorológicas. Este protocolo es capaz de ajustar la carga útil de las variables meteorológicas, reduciendo la trama enviada y, por ende, el consumo energético. Este protocolo está implementado para capturar 8 variables climáticas: temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, precipitación, radiación solar e índice UV.

En este protocolo existen dos tipos de tramas: la trama normal y la corta. La trama normal consta de 104 bits (13 bytes) (ver Figura 2.4), la misma consta de las variables meteorológicas, marca de tiempo y banderas (variación, nulo, ceros). La bandera de variación indica si los datos han sufrido algún cambio o si es el valor original. La bandera de nulos indica si el valor es válido o no. Por último, la bandera de ceros

refleja cuando el valor es cero o no lo es.

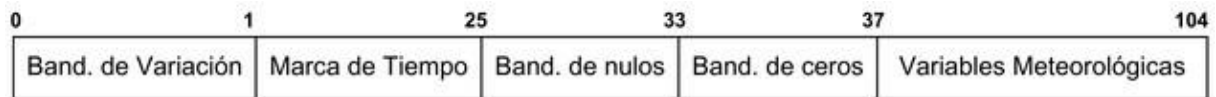


Figura 2.4: Modelo de la trama normal del protocolo VMTPv1

La carga útil corta presenta campos similares, pero sin contar con la bandera de nulos. Este tipo de trama solo envía las variaciones que poseen las variables meteorológicas. En este caso, el tamaño de la trama es de 9 bytes (ver Figura 2.5).

Por último, es importante mencionar que este protocolo captura y envía los datos instantáneamente al servidor cada 5 minutos, es decir; no es un protocolo acumulativo [2].

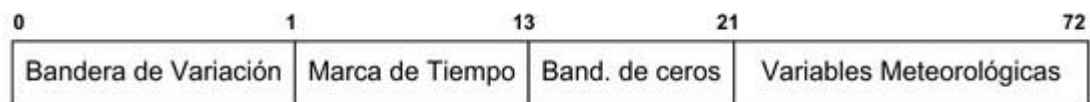


Figura 2.5: Modelo de la trama corta del protocolo VMTPv1

2.7. Hardware

En esta sección se describen de forma general los principales componentes de hardware que son utilizados en el desarrollo de este trabajo de titulación.

2.7.1. Módulo LoPy4

LoPy4 es una placa de desarrollo habilitada para MicroPython que dispone de cuatro tipos de redes (LoRa, Sigfox, WiFi, Bluetooth). Con el ESP32, el LoPy4 ofrece una combinación de facilidad de uso, flexibilidad, bajo coste y consumo de energía [7].

Además, LoPy4 (ver Figura 2.6) actúa como un nano Gateway LoRa y una plataforma de desarrollo (LoRa, Sigfox, WiFi y BLE) adecuada para todas las redes LoRa y Sigfox en todo el mundo. Se programa con MicroPython y los complementos de Pymark para un rápido desarrollo de aplicaciones IoT. También se puede configurar el LoPy4 en modo LoRa, para enviar paquetes directamente entre distintas placas [7].

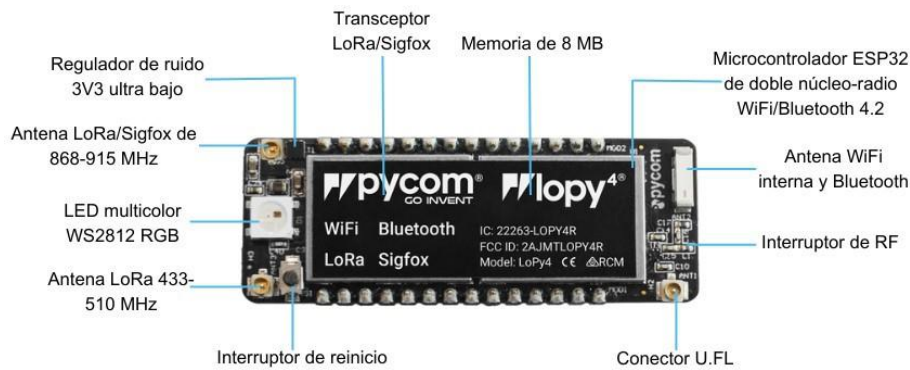


Figura 2.6: Placa de Desarrollo LoPy4.

En el apéndice D, se detalla a fondo las distintas características que posee este módulo.

2.7.2. Módulo GSM/GPRS SIM800L

El módulo SIM800L es un dispositivo quad-band GSM/GPRS, trabaja en las frecuencias GSM 850MHz, Extended GSM (EGSM) 900MHz, Digital Control System (DCS) 1800MHz y Personal Communications Service (PCS) 1900MHz. SIM800L cuenta con GPRS de múltiples clases: clase 12 y clase 10 (opcional), es compatible con los esquemas de codificación GPRS CS-1, CS-2, CS-3 y CS-4. Para su funcionamiento requiere un microcontrolador y principalmente un chip SIM 2G. Este módulo alcanza picos de corriente de hasta 2 amperes por lo que se debe asegurar que la batería pueda soportar dichas variaciones (ver Figura 2.7). [8]



Figura 2.7: Módulo GSM/GPRS SIM800L.

2.7.3. Sensor Davis 6490

El sensor Davis UV 6490 (Figura 2.8) es un radiómetro de precisión que detecta la radiación ultravioleta Ultra Violeta (UV) en longitudes de onda de 290 a 390 nanómetros. La respuesta espectral coincide estrechamente con el espectro de acción del eritema, definido por McKinlay y Diffey (1987) y reconocido internacionalmente como la radiación responsable del enrojecimiento de la piel humana [9].



Figura 2.8: Sensor Davis 6490.

2.7.4. Sensor Davis 6463

El colector de lluvia está diseñado para cumplir con las pautas de la Organización Meteorológica Mundial. La lluvia ingresa al cono colector, pasa a través de una pantalla de filtrado de desechos y se acumula en una cubeta basculante. El balde se vuelca cuando ha recogido una cantidad de agua igual al incremento en el que mide el colector (0,01.º 0,2 mm). Cuando el balde se vuelca, provoca un cierre del interruptor y regresa a su posición inicial. El agua se drena a través de los desagües ubicados en la base del colector (ver Figura 2.9) [10].

2.7.5. Sensor Davis 6440

El sensor de humedad del suelo WATERMARK (Figura 2.10) es un método indirecto y calibrado para medir el contenido de agua del suelo. Es un sensor que se basa en la resistencia eléctrica. La estación de humedad del suelo convierte la lectura de



Figura 2.9: Sensor Davis 6463.

resistencia eléctrica del sensor en una lectura calibrada de centibares de succión de agua del suelo con un rango de 0 a 200 centibares [11].



Figura 2.10: Sensor Davis 6440.

2.7.6. Sensor DS18B20

El sensor de temperatura GTS200 DS18B20 (Figura 2.11) es un sensor de temperatura inteligente, producido en DALLAS - Estados Unidos. Pertenece a una generación de sensores de temperatura adaptativos. El sensor convierte la señal de temperatura en señales digitales [12].

2.7.7. Sensor SHT11

El sensor SHT11 es de la familia de sensores de temperatura y humedad relativa de montaje superficial de Sensirion. Utiliza un elemento sensor capacitivo para medir la humedad relativa, mientras que la temperatura se mide mediante un sensor de banda



Figura 2.11: Sensor DS18B20.

prohibida. Ambos sensores están acoplados a un convertidor analógico-digital de 14 bits y un circuito de interfaz en serie (ver Figura 2.12) [13].

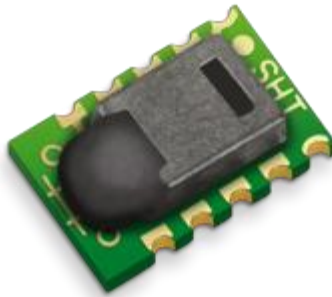


Figura 2.12: Sensor SHT11.

2.7.8. Sensor DHT22

El sensor de temperatura y humedad DHT22, utiliza una técnica de recolección de señales digitales y tecnología de detección de humedad, que garantiza su confiabilidad y estabilidad. Cada sensor de este modelo está compensado por temperatura, calibrado en una cámara de medición precisa y este valor se guarda en la memoria One Time Password (OTP). Cuando el sensor es activado, devuelve el coeficiente de dicha memoria. Además, posee un tamaño reducido y bajo consumo (ver Figura 2.13) [14].

2.8. ThingsBoard

ThingsBoard es una plataforma de IoT de código abierto que permite un rápido desarrollo, gestión y escalado de proyectos de IoT (Figura 2.14). El objetivo es proporcionar



Figura 2.13: Sensor DHT22.

la solución local o en la nube, que habilita la infraestructura del lado del servidor para diferentes aplicaciones de IoT [15].

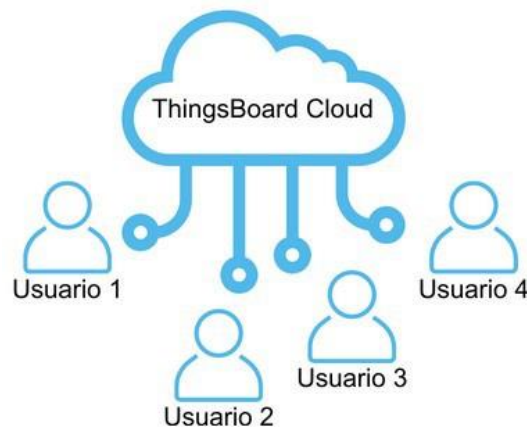


Figura 2.14: Plataforma ThingsBoard.

Con ThingsBoard es posible:

- Definir las relaciones entre dispositivos, activos y clientes.
- Recopilar y visualizar datos de dispositivos y activos.
- Analizar la telemetría entrante y activar alarmas con un procesamiento de eventos complejo.
- Controlar los dispositivos mediante llamadas a procedimientos remotos Remote Procedure Call (RPC).
- Crear flujos de trabajo basados en un evento del ciclo de vida del dispositivo.
- Diseñar tableros dinámicos y receptivos.
- Presentar telemetría e información de dispositivos o activos a los clientes.

- Habilitar funciones específicas de casos de uso mediante cadenas de reglas personalizables.
- Enviar los datos del dispositivo a otros sistemas.

2.9. Atom

Atom es un editor de texto de código abierto para macOS, Linux, y Windows; desarrollado por GitHub que puede utilizarse como IDE para un sinfín de lenguaje de programación (Figura 2.15). Su mayor potencial, es la modularidad de su entorno a la hora de instalar paquetes que añaden características al entorno. Incluye el sistema de control de versiones Git para publicar en la propia plataforma GitHub [16].



Figura 2.15: Editor de texto Atom.

Estado del arte y trabajos relacionados

El estudio de variables climáticas ha aumentado la creación de estaciones que buscan observar el comportamiento de las mismas a lo largo del tiempo. Para esto, la gran mayoría de estaciones utilizan dataloggers, los mismos que pueden ser microcontroladores conectados a sensores, que capturan los datos en tiempo real para guardarlos o enviarlos para su posterior análisis. Entre los proyectos que se centran en la transmisión y monitoreo de variables meteorológicas, destacan los proyectos desarrollados por el PROMAS.

Debido al difícil acceso a un número considerable de estaciones y a la necesidad de transmitir los datos en tiempo real, en el año 2014 se inicia con el diseño de una red para transmisión de las variables de los sensores de campo del PROMAS [17]. Este desarrollo plantea dos diseños de red utilizando diferentes tecnologías: WiFi y Zigbee, las mismas que son analizadas en cuatro aspectos fundamentales: distancia, energía, topología y ancho de banda. Como resultado de los diferentes escenarios de análisis, se encontró que Zigbee es la idónea para esta implementación. Esto se debe a la flexibilidad de topologías de red, sumado a la capacidad de que la red sea auto gestionable, pero principalmente por el menor consumo energético y reducido coste con relación a WiFi.

En una de las varias estaciones meteorológicas que el PROMAS posee, se continúa con el desarrollo del prototipo de un dispositivo que permite la adquisición y transmisión automática de las medidas (observaciones) realizadas por los sensores meteorológicos [18]. El prototipo utiliza los transductores de una estación Davis 6162 Wireless Vantage Pro2 Plus y para gestionar la adquisición, el almacenamiento y la transmisión de los datos se utilizó un microcontrolador con un sistema operativo de tiempo real. Los datos son registrados en una memoria SD y transmitidos mediante un módulo XBee. La referencia de fecha y hora se obtiene de un reloj de tiempo real sincronizado con un Global Positioning System (GPS). Además, el prototipo permite verificar su funcionamiento y configurar periodos de muestreo y transmisión. Como resultado, de acuerdo con las pruebas realizadas, el prototipo es capaz de adquirir, almacenar y transmitir los datos correctamente.

Otro tipo de estación que posee el PROMAS son las pluviométricas, es por ello que

otro estudio se planteó el “Diseño e implementación de un sistema de registro de datos de intensidad de lluvia basado en la placa de desarrollo LoPy4” [19]. Para este trabajo, después de un análisis de tecnologías se decidió cambiar la tecnología de Zigbee a LoRa. Este cambio fue realizado debido a que LoRa tiene un mayor alcance y menor consumo de energía que Zigbee. Este proyecto integra la adquisición, el almacenamiento y la transmisión inalámbrica de los datos. Existe un sistema de registro de datos (nodo de estación) y un sistema de reenvío de transmisión (nodo de puerta de enlace). Los resultados de esta implementación indicaron una fuerte correlación de los datos adquiridos por el sistema diseñado y los datos registrados por la estación DAVIS de referencia.

En [2], se utiliza un Gateway, en un lugar que posee cobertura celular para cargar los datos recolectados por los sensores. De esta forma, se ha equipado el Gateway con la tecnología GSM/GPRS para subir los datos al servidor (ver Figura 3.1). El principal aporte dentro de esta solución, es la propuesta del protocolo de capa de aplicación Variable Meteorological Transmission Protocol (VMTP). Este protocolo se ejecuta en LoRaWAN y maneja las variables meteorológicas de interés. El mismo es capaz de ajustar dinámicamente su carga útil en función de la información meteorológica que transporta. Esto se realiza para comprimir la trama enviada y, como consecuencia, disminuir el consumo de energía de todo el sistema.

El siguiente proyecto de interés se denomina: “Diseño e implementación de un registrador de datos pluviométricos en Printed Circuit Board (PCB) compacto” [20], utilizando componentes de montaje superficial con tecnología LoRa. Este desarrollo incorpora la adquisición, el almacenamiento y la transmisión inalámbrica de los datos. Para la comunicación de extremo a extremo, la tecnología LoRa se adhiere al protocolo LoRaWAN, su arquitectura está integrada por nodos distribuidos en toda el área de interés, y de un dispositivo Gateway entre los nodos y el servidor de red. La arquitectura del sistema es adaptada a 3,3V en su alimentación, para minimizar el consumo energético. Como resultado, de acuerdo con las pruebas realizadas, el dispositivo desarrollado presentó un funcionamiento óptimo en la adquisición, transmisión y almacenamiento de datos, así como también un bajo consumo de energía.

Otro proyecto ejecutado en el PROMAS es el “Diseño e implementación de un regis-

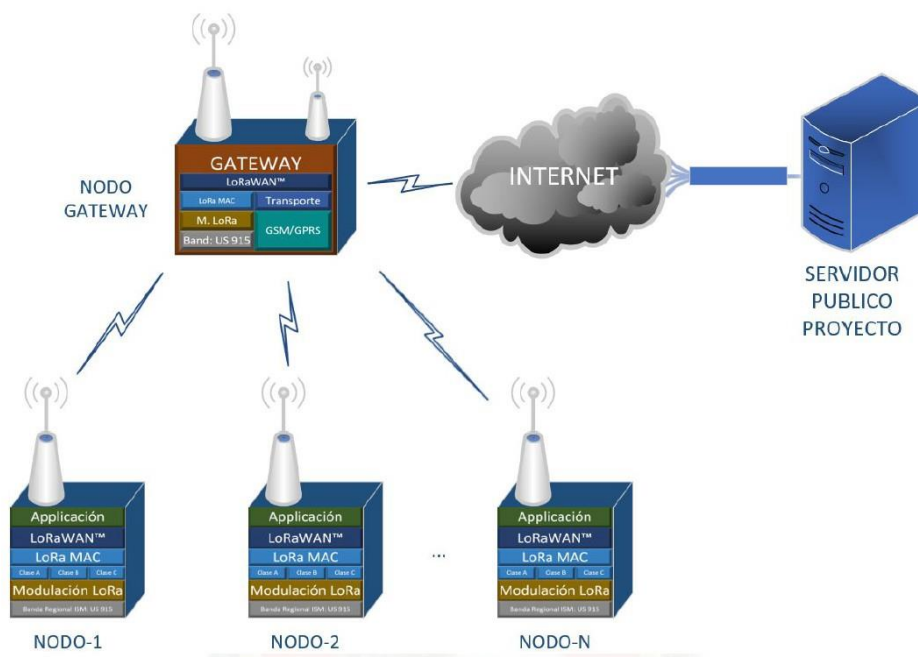


Figura 3.1: Esquema General del Sistema Completo de Transmisión

trador de datos para la adquisición de información limnigráfica”, este prototipo tiene la capacidad de coleccionar los datos, almacenarlos y transmitirlos con una área de cobertura de al menos 1 Km [21]. El dispositivo consta de un microcontrolador y transceptor de bajo consumo energético y largo alcance (LoRa), que permite configurarse como una red de área amplia. Además, para el registro de fecha y hora dispone de un reloj en tiempo real (Real Time Clock (RTC)), así como de un sensor de temperatura y humedad para controlar las condiciones de operación del dispositivo. El prototipo desarrollado es eficiente, compacto y de tamaño reducido gracias a una PCB desarrollada con componentes de montaje superficial.

En el artículo “ Aplicación de tecnologías inalámbricas al monitoreo climatológico en la cuenca del Río Paute” [22], se resume el desarrollo de los proyectos realizados en el PROMAS y detalla la arquitectura de red inalámbrica capaz de minimizar la latencia de la información generada en los sensores de las estaciones meteorológicas. Esto con el objetivo de disponer datos en tiempo real para su utilización en el análisis, la gestión de riesgos, generación de alertas tempranas, y para contribuir a la conservación de las fuentes y cuencas hídricas de la región austral del Ecuador. El diseño de la red se centró en la utilización de la tecnología de capa física LoRa, en conjunto con la arquitectura de red LoRaWAN.

Otro proyecto desarrollado que utiliza LoRa, es el que se presentó en la tesis realizada por Heredia y Lucero [23] intitulada “ Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial orientado a OLE for Process Control (OPC) de arquitectura unificada”. Este proyecto se centra en el desarrollo e implementación de una red testbed con arquitectura LoRaWAN, capaz de integrarse a sistemas de producción y manufactura en ambientes industriales, basados en OPC. El dispositivo que se utiliza en la capa física, (LoRa), tanto para el nodo como en el Gateway, es el chip SX1278 de Semtech, el cual opera en la banda de 433 MHz, permitiendo modificar el Spreading Factor (SF) y la potencia de transmisión. El servidor LoRaWAN y Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), destinados para la comunicación con aplicaciones externas, se montan sobre un ordenador Raspberry PI 3. Las mediciones y pruebas realizadas en los escenarios industriales y en los entornos urbanos abiertos, indicaron que la red diseñada es capaz de mantener un enlace con niveles de Signal to Noise Ratio (SNR), RSSI y porcentaje de pérdida de paquetes, en niveles adecuados para conservar un enlace de calidad y una red estable.

Dentro de los últimos proyectos desarrollados con LoPy para datos meteorológicos, se encuentra el “Despliegue de nodos para medidas de irradiación solar” [24], el mismo que se encuentra una serie de nodos midiendo la radiación solar. Esta implementación utiliza el protocolo MQTT para la comunicación entre sus nodos, además de esto utiliza Over The Air Activation (OTAA) para las actualizaciones sobre el aire y así realizar las configuraciones en los dispositivos. Por último, los datos son enviados y analizados en la plataforma Bosh IoT Hub, donde se realizan las correspondientes actualizaciones. Además, el dispositivo tiene una vida útil de aproximadamente un día con una batería de 1200 mA.

Otro proyecto centrado en la obtención de datos meteorológicos, es el presentado en “Sistema de medición de Variables ambientales SIMEVAM” [25]. Este proyecto se centra en la captura de datos meteorológicos en tiempo real (humedad, temperatura, velocidad del viento, lluvia). Para esto utilizan sensores ATLAS para la captura y estos datos son enviadas mediante protocolo LoRaWAN, hacia el servidor mediante conexión Ethernet; además de esto el sistema posee una estación Davis Vantaje Vue junto con el datalogger WheatherLinkIP envían los datos al servidor. Por último, el

sistema permite realizar configuraciones de parámetros para su transmisión, también generando reportes de datos que pueden ser analizados hasta meses posteriores de su captura.

En la tesis "Aplicación de la tecnología IoT para la medición de Variables meteorológicas en la agricultura sostenible" [26], se capturan datos meteorológicos en tiempo real para mejorar la siembra y el control de cultivos. El sistema está compuesto de dos nodos que se encargan del registro de las variables meteorológicas y las envían al Gateway mediante el protocolo LoRaWAN utilizando dispositivos Lopy4. Esta información es enviada al servidor The Things Network (TTN) mediante la tecnología GPRS. Para que las variables puedan ser visualizadas correctamente se utiliza el servidor ThingsBoard. Con estos datos la producción agrícola pudo ser controlada de mejor manera generando ahorros de agua y obteniendo un cultivo de excelente calidad.

El proyecto "Diseño de un nodo LoRa-GPS para la localización de bicicletas implementado en una red LoRaWAN" [27], se enfoca en el diseño de un nodo que combina tecnología LoRa con GPS para localizar bicicletas en tiempo real a través de la red LoRaWAN. El objetivo principal es obtener la ubicación precisa de las bicicletas en tiempo real y transmitir las mediante LoRa-GPS. El análisis de sensibilidad del GPS demostró que el rango de errores era menor a 20 metros, lo cual es aceptable para la búsqueda de las bicicletas. No obstante, uno de los principales desafíos de esta implementación, fue la capacidad de las baterías, ya que el dispositivo debe enviar constantemente la información de su posición. Por esta razón, se optó por utilizar una batería de 8800 mAh para aumentar el tiempo de monitoreo y garantizar un funcionamiento continuo.

El artículo "The relation of LoRaWAN efficiency with energy consumption of sensor node" se centra en el estudio de cómo la eficiencia de la tecnología LoRaWAN afecta el consumo de energía de los nodos sensores en una red [28]. Se analizan diferentes aspectos, como el rendimiento de la red, la tasa de éxito de transmisión, la duración de la batería y el alcance de la comunicación. A medida que aumenta la distancia, aumenta el RSSI, generando una distancia máxima de comunicación del sensor de humedad del suelo de 226 m con un RSSI de -16 dBm. La caracterización de la energía consumida en los distintos modos reflejó que con una batería de 3000 mAh

durará 6 días.

En el trabajo titulado "A Power Efficient Adaptive Data Rate Algorithm for LoRaWAN networks" [29], se presenta un nuevo algoritmo adaptable que permite realizar una compensación entre velocidad y potencia de transmisión, evitando el desperdicio de energía. El algoritmo plantea un monitoreo constante de la red, ajustando la tasa de datos de forma adaptativa dependiendo de las condiciones del canal utilizando la métrica SNR (Relación Señal-Ruido, por sus siglas en inglés). Si el SNR es alto, indicaría una buena calidad de señal, mientras que cuando es bajo sería un indicador de mala señal. De esta manera, el algoritmo reduce la tasa de datos y minimiza las pérdidas de paquetes. Al evaluar el algoritmo, mostró una mejora significativa en términos de eficiencia energética, logrando un buen rendimiento en cuanto a capacidad y latencia.

El artículo denominado "Diseño e implementación de una red LPWAN para medir el consumo de agua potable domiciliaria utilizando la tecnología LoRa de bajo costo para la junta administrativa de agua del sector de Gulanza del cantón Biblián" [30], presenta un sistema que consta de nodos con el objetivo de medir el consumo de agua de las viviendas. Los datos son transmitidos con LoRa hacia el Gateway, este se encarga de subir la información a LoRaServer y es almacenada en la base de datos influxdb. Es importante destacar que los datos pueden analizarse históricamente generando tramas de 12 bytes cada 5 minutos, el consumo de corriente genera picos de 32 mA y cuando los datos son enviados, el consumo es cercano a los 125mA.

Por último, el trabajo titulado "Estudio de Consumo Energético para Algoritmos de Recolección de Datos en Redes de Sensores Inalámbricos bajo el protocolo LoRaWAN" [31], se lleva a cabo un estudio en una red de sensores que recolecta información de fuentes de agua dulce y la transmite hacia un servidor central para su posterior análisis. Además, esta implementación propone tres tipos de codificación como estrategias para reducir el consumo de energía. Estas incluyen la codificación base (payload con valores instantáneos), la codificación de repeticiones (payload con valores repetidos) y la codificación diferencial (payload solo con diferencias entre valores). El análisis del consumo de corriente al utilizar diferentes codificaciones arrojó resultados significativos al momento de enviar los datos a través de la red LoRaWAN. Se observó una reducción en el consumo energético al utilizar la codificación diferencial debido a que

su consumo es menor, lo que permite enviar una mayor cantidad de datos en un solo mensaje.

Diseño e implementación

El presente trabajo de titulación implementa el protocolo de capa de aplicación VMTPv2 sobre el protocolo LoRaWAN. Este protocolo se ejecuta entre los nodos sensores y el servidor. El objetivo es ajustar la carga útil en función de la información meteorológica para minimizar el tamaño de la trama, reduciendo el consumo energético total del sistema. En este capítulo se describe la puesta a punto del sistema, la arquitectura de la red, las características de los dispositivos utilizados, el tamaño de las variables y la implementación del protocolo. En el diagrama que se observa en la Figura 4.1 se denotan los pasos antes mencionados.

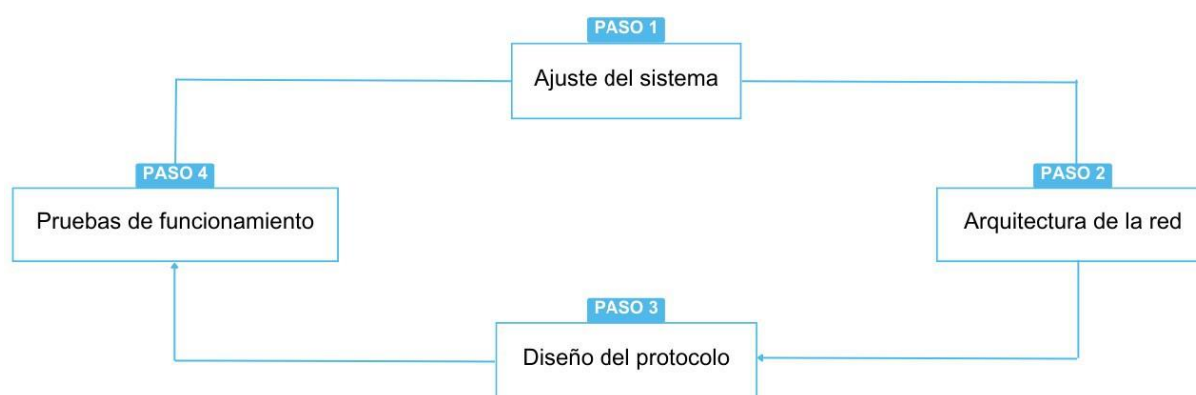


Figura 4.1: Pasos a seguir para la implementación.

4.1. Metodología

Para el desarrollo del trabajo, en la Figura 4.2 se propone una metodología que comprende cuatro etapas esquematizadas, donde se presenta un diagrama funcional que resume la metodología a emplear para el desarrollo del trabajo de titulación. En primer lugar, se realiza el ajuste y puesta a punto de cada uno de los dispositivos involucrados, para ello se verifica la versión de firmware y se realiza una limpieza profunda, con la finalidad de que trabajen de manera adecuada. Además, se implementa el programa de línea base en los dispositivos para verificar el funcionamiento de los sensores y de los diferentes elementos que forman parte de los mismos (panel solar, baterías y el reloj de tiempo real). El diseño está integrado principalmente por un Gateway, dos nodos que contienen los diferentes sensores enfocados en variables meteorológicas,

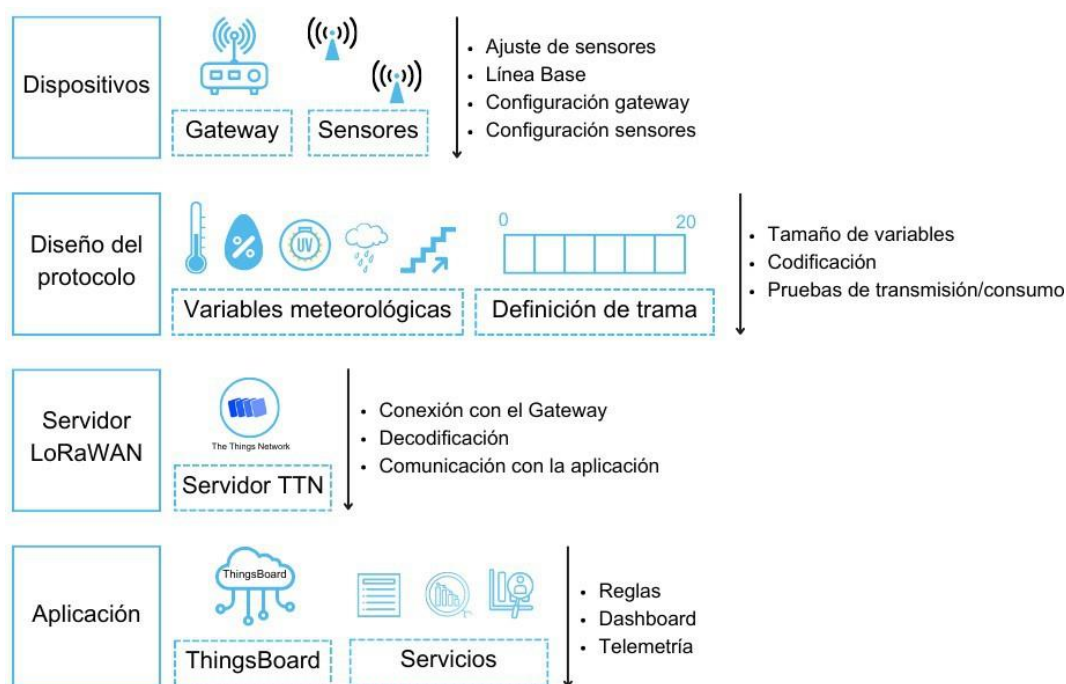


Figura 4.2: Diagrama funcional del sistema.

el servidor TTN y el ThingsBoard que forma parte de la aplicación. Posteriormente, en la segunda etapa se realiza el diseño del protocolo VMTPv2, con el objetivo de comprimir al máximo la trama que será enviada y como consecuencia, reducir el consumo energético global de la red. VMTPv2 utiliza la carga útil normal y la carga útil reducida. La carga útil se refiere los valores registrados por cada uno de los sensores meteorológicos. Mientras que la carga útil reducida, representa la variación que existe entre la carga útil normal con las lecturas posteriores. Para determinar la cantidad óptima de bits para la codificación, se analiza cada variable. Para ello, se toma como referencia los datos históricos de las distintas variables dentro del país. Con el propósito de evaluar el comportamiento del protocolo, se realizan un conjunto de experimentos entre los nodos y el Gateway (ver Sección 5), que involucran los parámetros de transmisión (índice RSSI) y consumo energético. Dichos parámetros fueron evaluados en una zona rural y con topografía variada, a fin de caracterizar el comportamiento general de la red y definir las configuraciones adecuadas que generan estabilidad en la comunicación, como: las distancias entre nodos/Gateway y el tamaño de los mensajes. En la tercera fase, para recibir y decodificar las variables de la red LoRaWAN, se utiliza el servidor TTN, que ofrece componentes para este tipo de redes. En cuanto a la aplicación, correspondiente a la cuarta etapa, se utiliza la plataforma ThingsBoard

con el propósito de comunicarse con el servidor TTN, y presentar la información al administrador a través de una interfaz gráfica de uso sencillo.

4.2. Ajuste del sistema

Previamente a la implementación del protocolo, se pone en funcionamiento el programa de línea base desarrollado por el equipo de investigación del PROMAS. Este proyecto incluye un Gateway y dos nodos sensores, similares a los que forman parte del diseño de este trabajo, los cuales se describen posteriormente.

4.2.1. Firmware

El primer paso consta de la puesta a punto de los módulos LoPy. Los módulos LoPy se conectan uno por uno con el fin de conocer la versión de firmware usando Atom. Si la versión del firmware es anterior a la v1.20.2.r6 se la actualiza utilizando los pasos descritos en <https://docs.pycom.io/updatefirmware/device/>.

4.2.2. Puesta a punto del hardware

Debido al uso y al tiempo que pasaron los dispositivos sin ser utilizados, estos no estaban operativos. Las placas y sensores presentaban signos de sulfatación, por lo que se realizó una limpieza profunda y una inspección exhaustiva para evitar fallos en el funcionamiento.

4.2.3. RTC

Otro sistema configurado antes de iniciar la implementación del protocolo, es el reloj de tiempo real (RTC) DS3231. Este reloj funciona con una pila externa del tipo CR2032, la cual fue reemplazada en cada dispositivo (Gateway y nodos) para un correcto desempeño.

4.2.4. Implementación del programa de línea base

Una vez que el Gateway y los nodos están configurados, se descargan los diferentes archivos que forman parte del programa base desarrollado por el PROMAS. Los cuales están disponibles en GitHub <https://github.com/OpenWaterNetwork/IoT>. Al cargar los programas en cada uno de los módulos LoPy, se encontraron varios conflictos que no permitieron un funcionamiento adecuado, los mismos que se detallan a continuación:

- **Consumo energético:** El Gateway (con una batería de 4500 mAh y conectado a un panel solar) que posee un alto consumo de corriente causado por el módulo SIM800L, durante las horas de sol funcionaba de manera correcta. Pero al llegar la noche y posteriormente la madrugada, el dispositivo se encendía, pero no enviaba los datos al servidor. Por lo que luego de varias semanas de prueba, se optó por el cambio de batería con una capacidad de 6600 mAh. De esta manera, el dispositivo no pierde conexión a Internet y logra enviar la información a cualquier hora del día.
- **Captura de datos:** Los sensores tuvieron daños debido a que estuvieron largos periodos de tiempo al aire libre. Algunos de ellos tienen errores al momento de capturar la información de las diferentes variables meteorológicas. Por lo que, la mayoría de los sensores fueron reemplazados; sin embargo, algunos no se adquirieron debido a su elevado costo o porque ya no se producen.
- **Módulo de carga solar.** El circuito de carga solar está compuesto por un convertidor de voltaje DC-DC LM2596, seguido del módulo de carga del panel solar CN3791. Estos dispositivos son sensibles al tacto y propensos a cortocircuitos, lo que causó varios problemas durante la instalación y las distintas pruebas. Para evitar estos inconvenientes en un futuro, fueron colocados en una caja pequeña en donde no pueden ser manipulados.

4.3. Arquitectura de la red

En esta sección se detalla la especificación de los componentes físicos, la forma en la cual están organizados y configurados, sus procedimientos y principios operacionales, así como el protocolo de comunicación utilizado para el funcionamiento de este sistema. La Figura 4.3 presenta de manera general la estructura de la red, la cual consta de: los nodos sensores, el Gateway, el servidor y la aplicación.

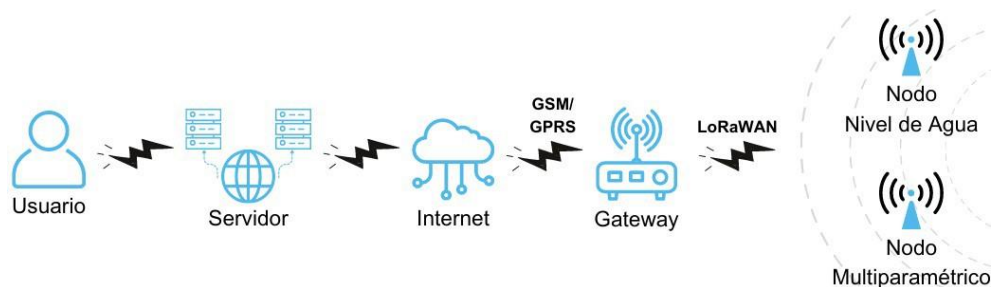


Figura 4.3: Arquitectura de red.

- **Nodos Sensores:** Los sensores son los encargados de obtener las lecturas, y luego codificar y transmitir cada una de las variables meteorológicas.
- **Gateway:** Se utiliza de enlace entre el servidor y los nodos sensores. Además, envía al servidor los datos codificados con los encabezados LoRaWAN mediante la red GSM/GPRS.
- **Servidor:** Se encarga de la administración de los datos que se envían desde el Gateway y que posteriormente se retransmiten a la aplicación.
- **Aplicación:** Plataforma en donde se realiza la decodificación y visualización de las variables meteorológicas.

4.3.1. Nodos sensores

Para la implementación de los nodos se aplica el modo LoRaWAN. Este modo admite dos métodos de conexión para acceder a la red: OTAA y Activation by Personalization (ABP). En este trabajo de titulación, los nodos se configuran utilizando el método ABP.

Al emplear ABP se debe configurar manualmente las claves de cifrado en el dispositivo; las tramas se envían al Gateway sin necesidad de un procedimiento de handshake

para intercambiar las claves. Para la autenticación, este método requiere los siguientes valores:

- **DevAddr**: Dirección del nodo.
- **AppSKey**: Clave de sección de aplicación.
- **NwkSKey**: Clave de sección de red.

Estas variables se configuran en los módulos LoPy correspondientes a los nodos y en el servidor. La comunicación entre un nodo y el Gateway se realiza de acuerdo al diagrama la Figura 4.4.

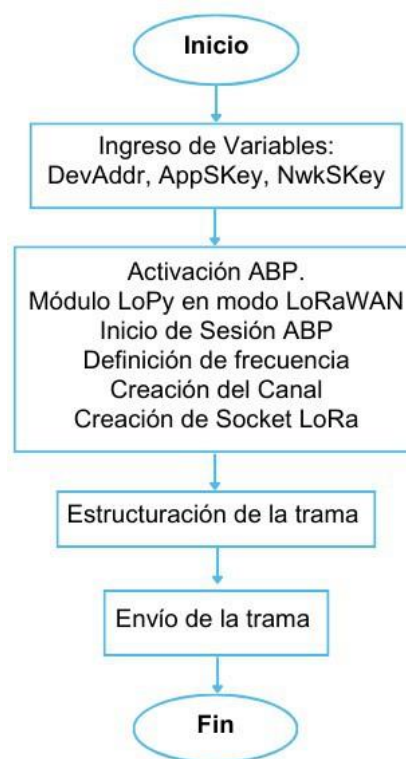


Figura 4.4: Comunicación entre nodo y Gateway.

Este procedimiento requiere que las variables de entrada (dirección del nodo y claves) estén definidas en el módulo LoPy, inmediatamente después inicia en modo LoRaWAN, se aplica la activación ABP, se coloca la frecuencia de trabajo para finalmente habilitar el socket; que se utiliza en la transmisión de la trama del protocolo VMTPv2.

4.3.2. Gateway

Se utilizan dos tipos de tecnologías de transmisión inalámbricas en el Gateway para el reenvío de paquetes: la tecnología LoRa, que se usa para la comunicación con los nodos sensores, y la red de retorno IP Backhaul IP stack, para la conexión a la red móvil de segunda generación GSM/GPRS (mediante el protocolo User Datagram Protocol (UDP) y el puerto 1700). En este puerto se encuentra escuchando el servidor TTN. El código fuente desarrollado se encuentra disponible en <https://github.com/0penWaterNetwork/IoT>.

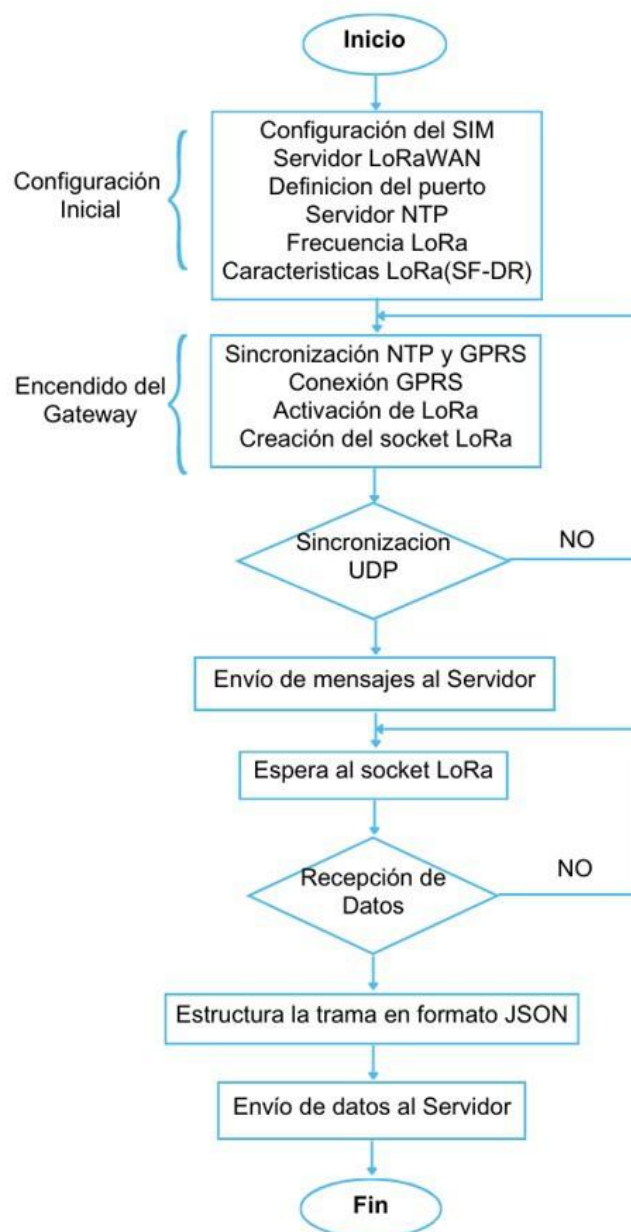


Figura 4.5: Configuración del Gateway.

El primer paso dentro del diagrama de la Figura 4.5, define las variables iniciales tales como: nombre/clave de la tarjeta SIM usada para la comunicación GSM/GPRS, posteriormente se debe ingresar el nombre/puerto del servidor, frecuencia de operación LoRa y el nombre del servidor Network Time Protocol (NTP). A continuación, se describen las distintas asignaciones que poseen cada una de ellas.

- **Nombre de la tarjeta SIM:** internet.claro.com.ec.
- **Nombre y puerto del servidor:** El nombre y puerto del servidor hace referencia a la dirección pública del servidor, en este caso es la 190.15.132.17. y el puerto utilizado es el 1700.
- **Nombre del servidor NTP:** pool.ntp.org.
- **Frecuencia de operación:** 915MHz.
- **Características LoRa:** Tasa de codificación de 4/5 Data Rate (DR) y un factor de ensanchamiento de 9 SF. Se utilizan estos valores porque generan un amplio rango de cobertura y un mínimo impacto en términos de batería (consume menos potencia al momento de la transmisión).

4.3.3. Servidor

Para visualizar y decodificar las variables de la red LoRaWAN, se utiliza el servidor TTN. Este se encarga de comunicar los nodos finales con el Gateway y a su vez de reenviar los datos al ThingsBoard para su visualización. Para establecer la conexión entre dispositivos, es necesario colocar las credenciales de ABP u OTAA, como se mencionó anteriormente.

The Things Stack (ver Figura 4.6) puede trabajar como un servidor local (The Things Stack (TTS)), un servidor en la nube (TTN) y por último, un servidor dedicado a la industria (The Things Industries (TTI)). Para esta implementación se utilizó la versión de servidor local (TTS) y un servidor en la nube (TTN).

La información proporcionada de cada nodo se visualiza en el servidor en el campo de “Aplicaciones”; para lograr este objetivo, primero se debe realizar la configuración. LoRaWAN encripta los paquetes tanto en capa de red como de aplicación usando

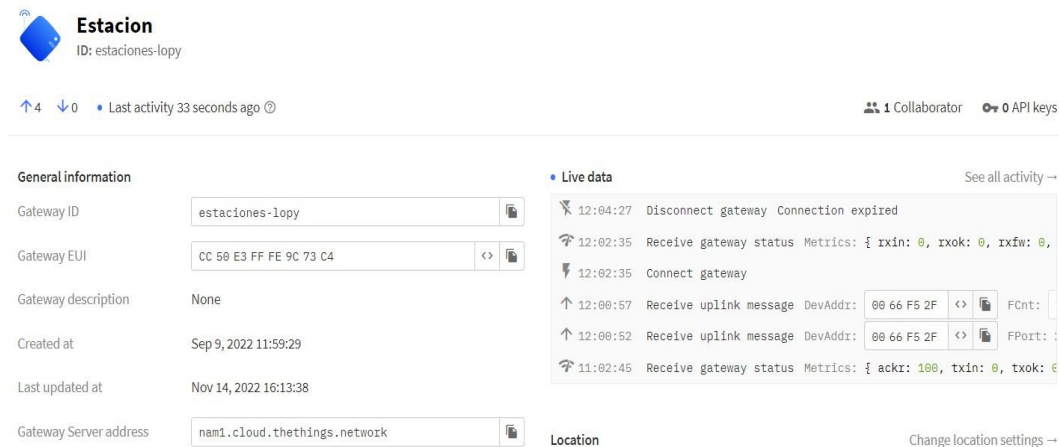


Figura 4.6: Interfaz del servidor.

Advanced Encryption Standard 128 (AES-128). El payload es cifrado y enviado desde cada nodo al servidor, este lo decodifica utilizando diferentes formatos (Cayenne LPP, Remote Procedure Calls (gRPC) Service), en este caso se utiliza el formato personalizado de javascript.

Una vez decodificado el payload, se envía mediante un weebhook; esto permite comunicar el servidor TTN con la plataforma de monitoreo y procesamiento de datos IoT denominada ThingsBoard (Figura 4.7). En esta última, se ordenan las diferentes variables, se ingresan las distintas cadenas de reglas y se exponen los datos para que los usuarios puedan acceder a ellos.

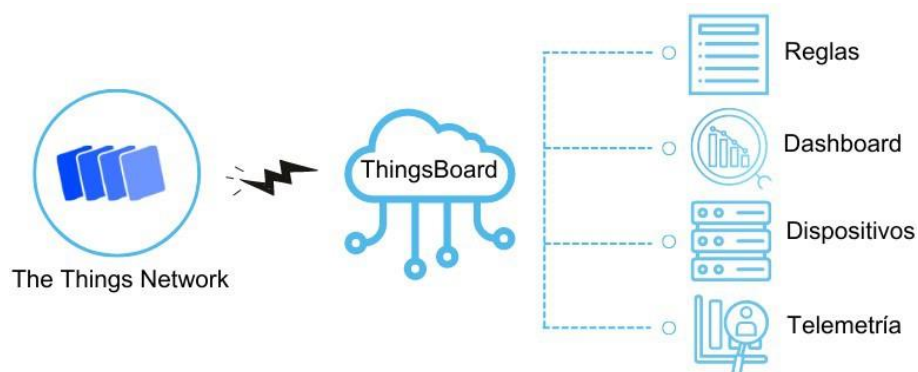


Figura 4.7: Integración del servidor TTN y ThingsBoard.

4.3.4. Conectividad

El diagrama 4.8 indica los diferentes pasos para la conexión del Gateway con el servidor LoRaWAN. Lo primero que se realiza es la conexión del módulo GSM/GPRS

a Internet, para enlazar al Gateway con el servidor NTP pool.ntp.org, con ello se efectúa la sincronización y se actualiza la fecha y hora. Posteriormente, se crea un socket UDP entre el servidor y el Gateway para el envío de los datos.

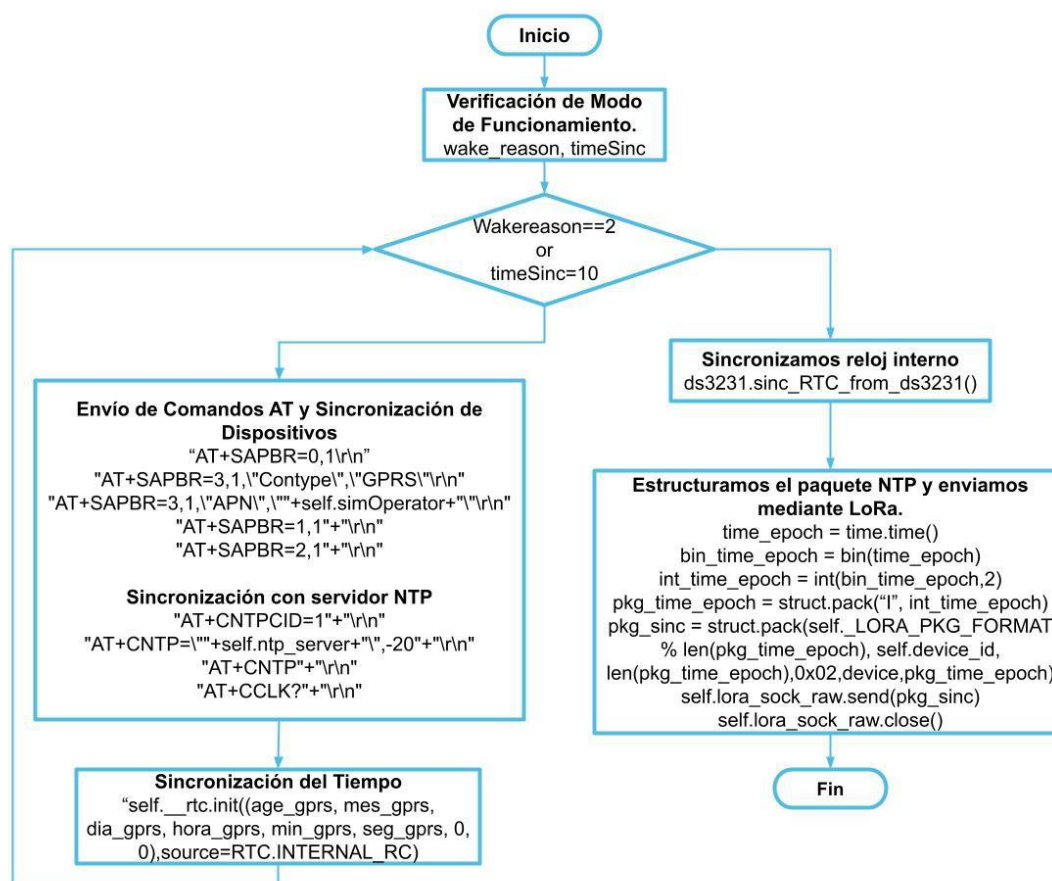


Figura 4.8: Diagrama de Flujo para sincronización con el servidor NTP.

Para acceder a la aplicación desde cualquier lugar, el servidor debe tener una dirección IP pública; esta dirección es la 162. 159. 200. 123. La aplicación está configurada para escuchar en el puerto 1700. Los datos se envían a través del socket UDP. El acceso a la aplicación requiere un registro, el cual entrega un usuario y contraseña válidos para el ingreso y visualización de las variables meteorológicas. El proceso de instalación y configuración se lo detalla en el Apéndice A.

La aplicación está desarrollada, en la versión gratuita, en la página <https://demo.thingsboard.io/>. Para ingresar a ThingsBoard (Figura 4.9) se necesitan las credenciales de autenticación. En esta plataforma es posible administrar y gestionar las variables meteorológicas, adicionalmente se puede guardar y exportar la información recolectada por los diferentes nodos.

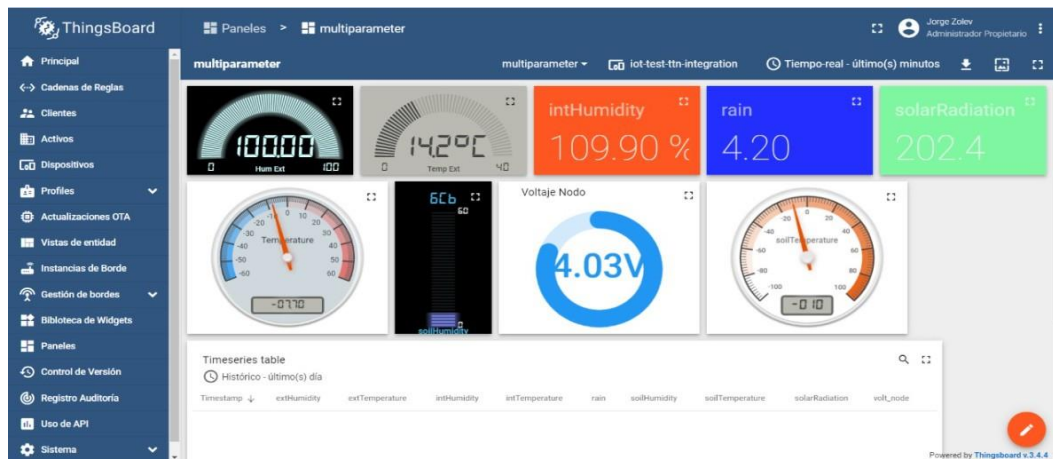


Figura 4.9: Interfaz de ThingsBoard.

4.4. Dispositivos

A continuación, se detallan cada uno de los dispositivos utilizados en este trabajo:

4.4.1. Gateway

Los elementos que conforman el Gateway (ver Figura 4.10) son los siguientes:

- Módulo Lopy4.
- Módulo GSM/GPRS SIM800L.
- Módulo de carga del panel solar CN3791.
- Convertidor de voltaje DC-DC LM2596.
- Reloj de tiempo real (RTC) DS3231.
- Batería recargable de litio – 3.7V y 6600mAh.
- Panel Solar SP030P - 30W y 18V.

4.4.2. Nodos

4.4.2.1. Multiparamétrico

Los dispositivos que en conjunto dan lugar a este nodo (Figura 4.11) son los que se presentan a continuación:

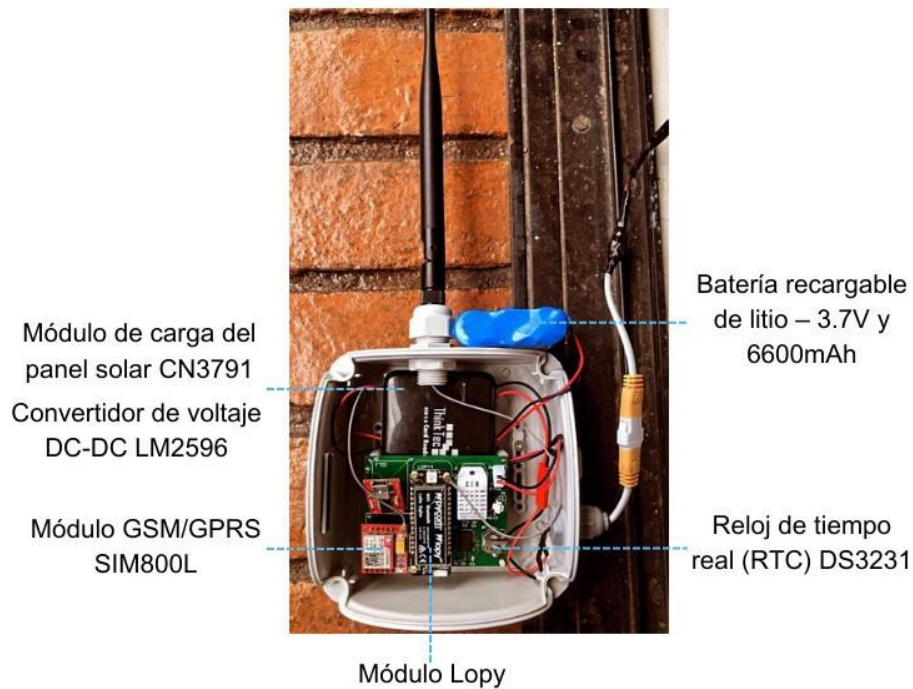


Figura 4.10: Dispositivos que conforman el Gateway.

- Módulo Lopy4.
- Reloj de tiempo real (RTC) DS3231.
- Sensor de radiación ultravioleta UV Davis 6490.
- Colector de lluvia Davis 6463.
- Sensor para humedad del suelo Davis 6440.
- Sensor para temperatura del suelo DS18b20.
- Sensor para temperatura y humedad externa SHT11.
- Sensor para temperatura y humedad interna DHT22.
- Bateria recargable de litio – 3.6V y 5000mAh.

4.4.2.2. Nivel de agua

Al igual que en el caso del multiparamétrico, se detallan cada uno de los dispositivos que conforman el nodo (Figura 4.12).

- Módulo Lopy4.

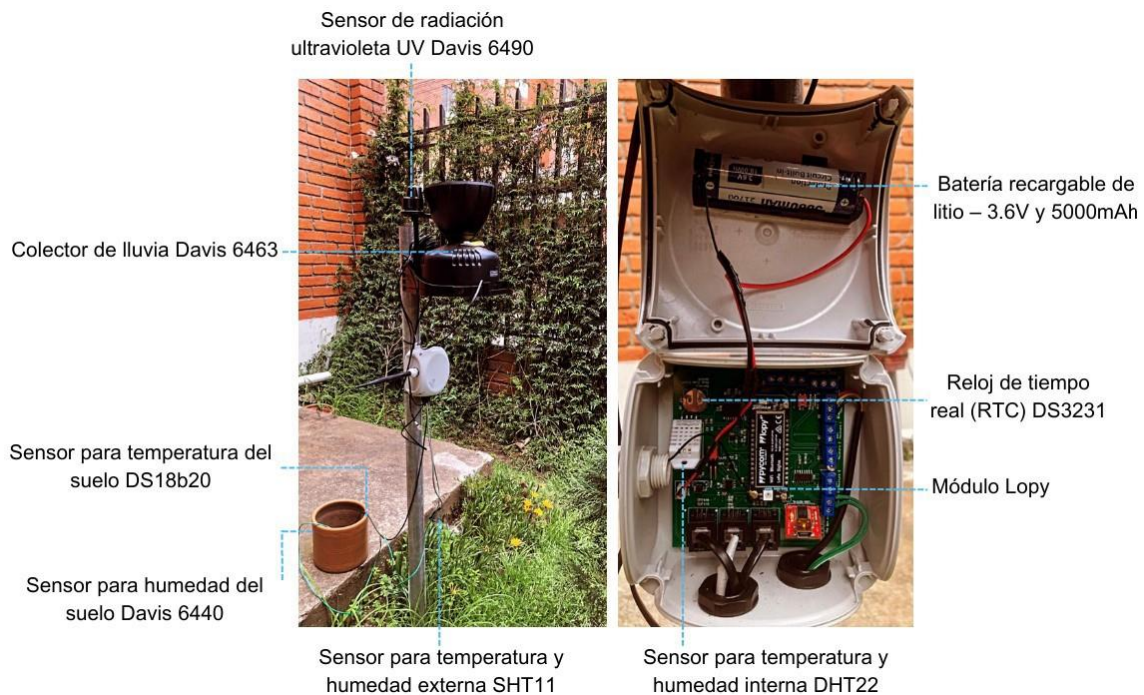


Figura 4.11: Dispositivos que conforman el nodo multiparamétrico.

- Reloj de tiempo real (RTC) DS3231.
- Sensor ultrasónico de nivel y distancia DL-MBX-001.
- Sensor para temperatura y humedad interna DHT22.
- Batería recargable de litio – 3.6V y 5000mAh.

4.5. Diseño del protocolo

El protocolo propuesto tiene como objetivo ajustar la carga útil en función de la información meteorológica a transmitir. Esto se realiza con el objetivo de comprimir al máximo la trama que será enviada y como consecuencia, reducir el consumo energético global de la red. Para ello, se define el tamaño de las variables y se estructura la trama del protocolo.

La trama VMTPv2 utiliza la carga útil normal y la carga útil reducida. La carga útil normal representa los valores registrados por cada uno de los sensores meteorológicos. Mientras que la carga útil reducida, representa la variación que existe entre la carga útil normal con las lecturas posteriores realizadas por los diferentes sensores en un tiempo determinado. VMTPv2 almacena las lecturas de los diferentes sensores y las

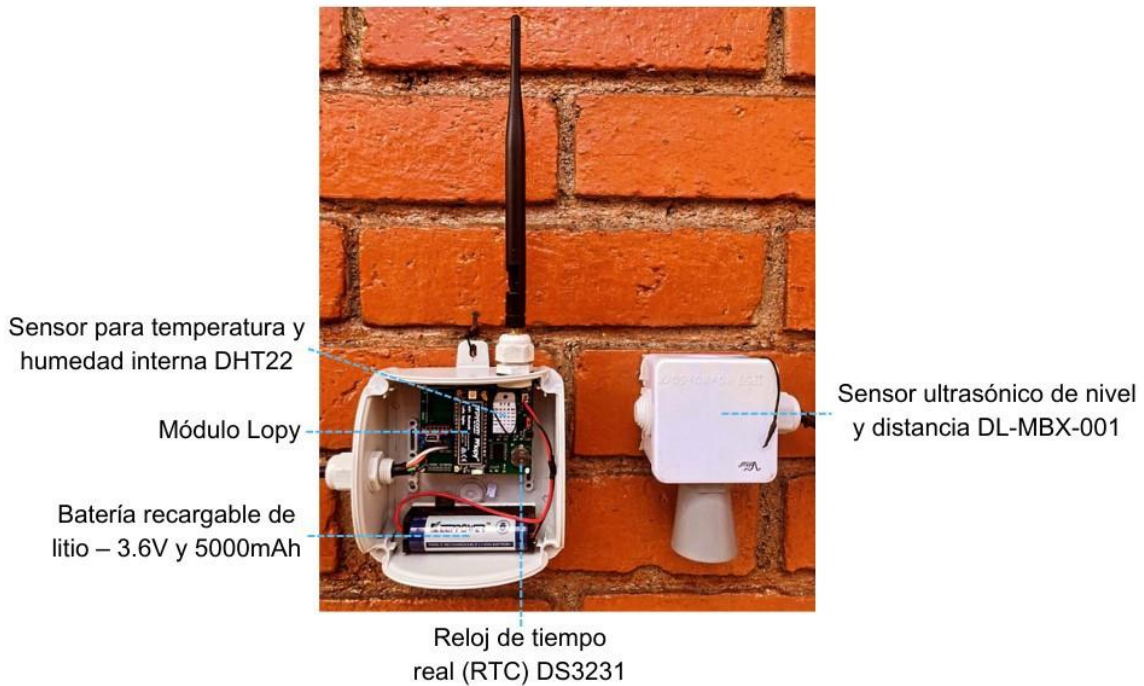


Figura 4.12: Dispositivos que conforman el nodo de nivel de agua.

envía en un tiempo determinado por el usuario, que puede ir desde los 5 minutos hasta los 60 minutos.

A continuación, se ilustra con un ejemplo lo descrito en el párrafo anterior, para ello se ha tomado como referencia la medición de la temperatura en intervalos de cinco minutos y a lo largo de una hora.

Tabla 4.1: Definición de la trama.

Tiempo(min)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Mediciones(°C)	18.8	18.9	19.0	18.9	18.9	18.8	18.8	18.9	18.9	18.9	19.0	19.0
Transformación	288	289	290	289	289	288	288	289	289	289	290	290
VMTPv2	288	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
	C.N	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11

Como se observa en la Tabla 4.1, se tiene un total de doce mediciones en una hora (si se realizan lecturas cada cinco minutos). Para simplificar el tratamiento de los datos, en la fila denominada “Transformación”, se suma y se multiplica por diez a cada una de las distintas mediciones, convirtiéndolas a números enteros positivos. Posteriormente, se realiza la resta de la segunda medición con la primera (C.N - Carga útil Normal); la tercera menos la segunda y así sucesivamente hasta obtener las diferentes variaciones (V1, V2, ... V11). Es importante mencionar que al momento de capturar los datos y para evitar fallas en las lecturas de los sensores, se realizan un total de veinte

mediciones y se aplica la métrica estadística denominada moda; para obtener el valor que será analizado. Si se toma como referencia la trama del nodo multiparamétrico y siguiendo el proceso que será descrito en la Sección 4.5.1, se logra una reducción de 112 bytes en comparación al envío de datos sin ningún tipo de protocolo. En otras palabras, la trama disminuye de 192 bytes a tan solo 80 bytes.

Las variables meteorológicas pueden ser enviadas en intervalos de entre 5 y 60 minutos. Por esta razón, la trama es diseñada con el objetivo de enviar la menor cantidad de datos sin perder información de los diferentes sensores. En las Figuras 4.13, 4.14 y 4.15, se estructura la trama del protocolo VMTPv2; incluyendo la marca de tiempo, las variables meteorológicas y el nivel de batería del nodo.

Para el diseño de la trama se toma en cuenta el valor máximo permitido del payload que posee el dispositivo. Este valor depende en su mayoría del DR utilizado en la transmisión; en esta implementación se aplica un DR igual a 4/5. Según el estudio que se detalla en [32], existe un límite de 53 bytes al usar LoRa y el protocolo LoRaWAN. Al realizar diferentes pruebas, se obtiene 52 bytes como valor máximo, similar al descrito anteriormente.

La trama del nodo nivel de agua se encuentra en 20 bytes (ver Figura 4.13), por lo que no existe problema para el envío de toda la información en un solo mensaje. Sin embargo, la información de los 8 sensores del datalogger multiparamétrico tiene un payload de 87 bytes, superando al máximo permitido, por lo cual no se puede enviar la información hacia el Gateway en una sola trama.

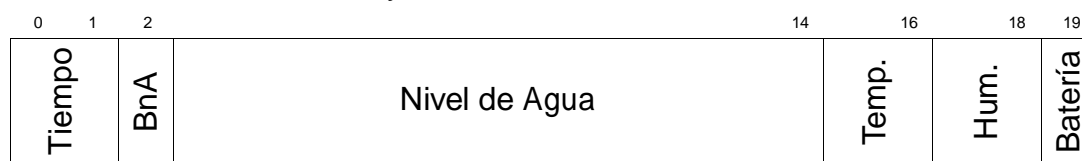


Figura 4.13: Trama de datalogger de nivel de agua

Para solucionar este inconveniente, se opta por dividir los datos en dos mensajes. El primer mensaje contiene 44 bytes, conformados por: la marca de tiempo, banderas correspondientes a cada uno de los sensores, la información de tres sensores de humedad, uno de temperatura y seguido del nivel de batería. El segundo mensaje tiene una longitud de 45 bytes, compuesto por: la marca de tiempo, banderas correspondientes a cada uno de los sensores, la información de la radiación solar, temperatura

del suelo, lluvia y temperatura interna (ver Figura 4.14 y Figura 4.15).

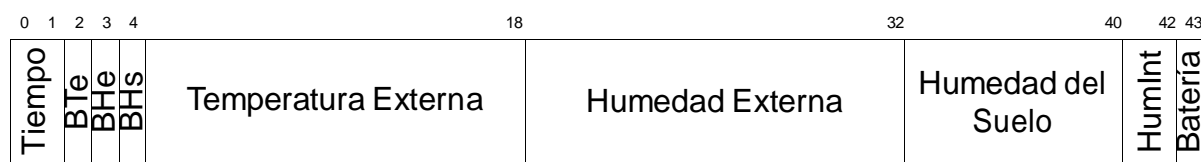


Figura 4.14: Trama del primer mensaje del datalogger multiparamétrico

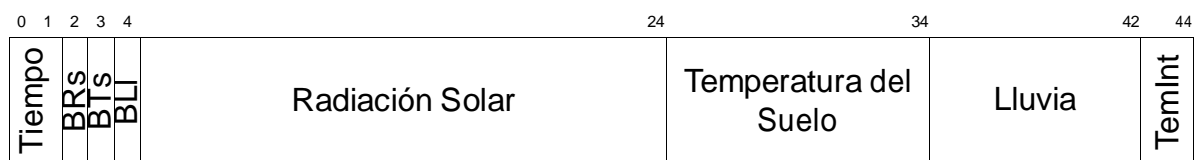


Figura 4.15: Trama del segundo mensaje del datalogger multiparamétrico

LoRa utiliza el cifrado AES-128; este algoritmo posee una clave para la codificación proporcionada mediante el AppSKey y bloques de encriptación de un tamaño de 128 bits (16 bytes). Al analizar las tramas de este protocolo, el nodo nivel de agua abarca 2 bloques de encriptación lo que genera 32 bytes al momento de enviar la información. De igual manera, para el primer y segundo mensaje del nodo multiparamétrico, se tienen 3 bloques de encriptación; lo que da lugar a una trama de 48 bytes para cada uno. Es importante mencionar que, si el bloque de datos es menor a 16 bytes, el cifrado AES-128 rellena los espacios con ceros hasta completar la longitud del bloque (ver Figura 4.16).

4.5.1. Codificación

La codificación de los datos se realiza en función de las variables meteorológicas que se van a transmitir. Para determinar la cantidad óptima de bits para la codificación, se analiza cada variable. Para ello, se toma como referencia los datos históricos de las distintas variables dentro del país.

Además, es importante mencionar que para algunas variables; se requiere una precisión de decimal de uno y con el objetivo de facilitar el tratamiento de los datos, no se trabaja con números negativos. Para cumplir con el primer caso, se multiplica por diez para transformar a un número entero. Posteriormente, se suma la misma cantidad a cada una de las lecturas para obtener solo números positivos. Este procedimiento se

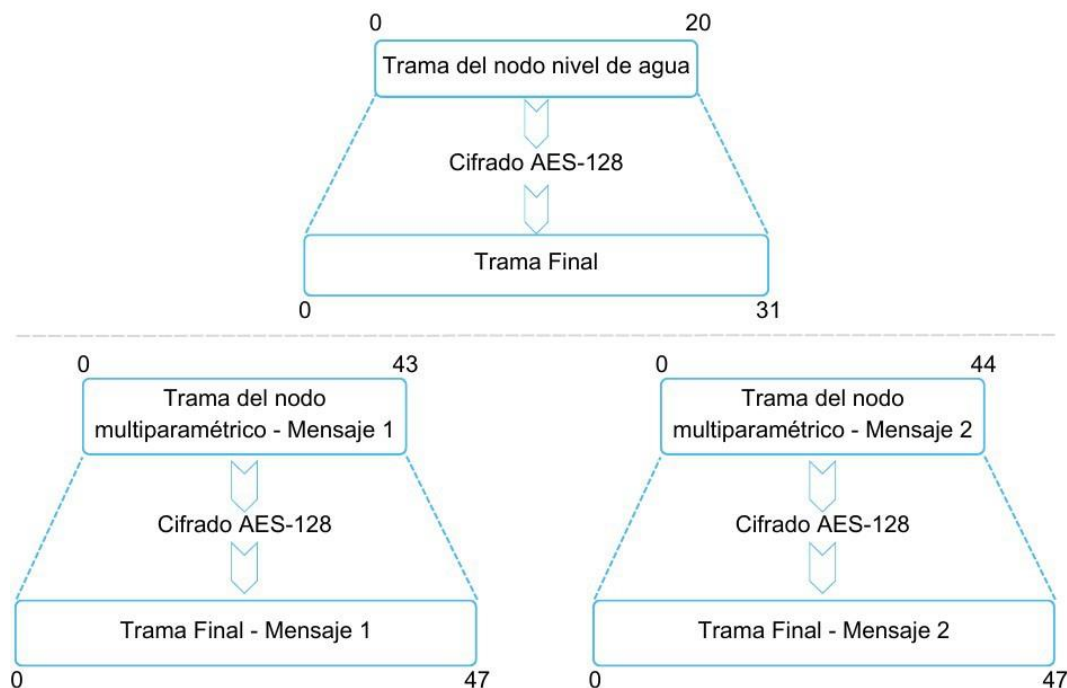


Figura 4.16: Trama final de los nodos con cifrado AES-128.

puede observar en la columna “Transformación” de cada una de las tablas que se detallan posteriormente (4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6).

Temperatura Según la información entregada en el año 2021 por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), en Lumbaquí provincia de Sucumbíos, se registró la temperatura más alta con un valor de 39.4°C. Al contrario, el valor mínimo registrado es de -3°C en el parque nacional El Cajas [33]. A nivel mundial, la temperatura máxima registrada alcanzó un valor de 56.7°C en la estación de Furnace Creek-EE.UU. Por otra parte, la temperatura más baja registrada fue de -89.2°C en la Base Vostok, en la Antártida Oriental. [34]

Para la representación de esta variable dentro del protocolo VMTPv2 se utilizan los valores máximos y mínimos registrados dentro de la República del Ecuador. Los mismos que se ilustran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Tamaño de la variable temperatura.

V. Máximo (°C)	Transformación	Bits	# Bits
39.4	494	111101110	9
V. Mínimo (°C)	Transformación	Bits	# Bits
-3.0	70	111	3

Puesto que el valor máximo de la temperatura está definido por 9 bits, la carga

útil normal puede ser expresada en ese mismo tamaño. Las distintas variaciones, se establecen en 6 bits cada una de ellas; debido a que puede existir una diferencia entre lecturas de esta longitud.

Humedad Al igual que la temperatura, los datos de la humedad en Ecuador se obtienen a través del INAMHI, el cual indica que la humedad dentro de este territorio varía en un rango aproximado del 10 % al 80 % [33]. A nivel mundial el escenario cambia, la humedad relativa más alta registrada, alcanza un valor aproximado de 83 %, en Mawsynram(India). Y la más baja se registró en Safi-Abad Dezful, Irán; con un valor cercano a 0.3 % [35].

Con la finalidad de representar esta variable dentro del protocolo VMTPv2, se utilizan los valores máximos y mínimos registrados dentro del país. Los mismos que se detallan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Tamaño de la variable humedad.

V. Máximo (%)	Transformación	Bits	# Bits
80.0	900	1110000100	10
V. Mínimo (%)	Transformación	Bits	# Bits
10.0	200	11001000	8

Debido a que el valor máximo de la humedad se puede expresar con 10 bits, la carga útil normal puede ser expresada en ese mismo tamaño. Las distintas variaciones, se establecen en 7 bits cada una de ellas; debido a que puede existir una diferencia entre lecturas de esta longitud.

Precipitación El clima en Ecuador es tropical húmedo, por lo que las lluvias están presentes durante todo el año. El valor máximo de precipitación alcanza 95mm, y en los momentos de mayor sequía se tiene 0mm de precipitación [33]. Tomando como referencia todo el planeta, la mayor precipitación registrada fue en Cherrapunji (India), con 2493 milímetros. En cambio, la más baja producida es de 0.00 mm, en el Desierto de Atacama (Chile) [36].

Dentro del protocolo VMTPv2, se utilizan los valores máximos y mínimos registrados dentro del país. Los mismos que se detallan en la Tabla 4.4.

A causa de que el valor máximo en bits que alcanza la precipitación es de 7, la carga útil normal puede ser definida en ese mismo tamaño. Las distintas varia-

Tabla 4.4: Tamaño de la variable precipitación.

V. Máximo (mm)	Transformación	Bits	# Bits
95	105	1101001	7
V. Mínimo (mm)	Transformación	Bits	# Bits
0	10	1010	4

ciones, se establecen en 5 bits cada una de ellas; debido a que puede existir una diferencia entre lecturas de esta longitud.

Radiación UV La alta radiación ultravioleta (UV), afecta a varias zonas del Ecuador. El INAMHI [33] señala que en la región Interandina su índice oscila entre 7 y 13, es decir; entre alto y extremadamente alto. El primer puesto a nivel mundial es de los Andes bolivianos, específicamente en volcán Lincancabur, a 4360 metros sobre el nivel del mar. En esta ubicación se midieron niveles récord: un índice de 43, teniendo en cuenta que un índice de 11 es considerado extremo [37].

Ya que el sensor Davis 6490 entrega las lecturas de radiación en $J/m^2/hora$, y en un rango de 0 a 1999. Se utilizan estos valores como máximos y mínimos, tienen su equivalencia en índice UV y están descritos en [38].

Tabla 4.5: Tamaño de la variable Radiación UV.

V. Máximo ($J/m^2/hora$)	Transformación	Bits	# Bits
1999	N/A	11111001111	11
V. Mínimo ($J/m^2/hora$)	Transformación	Bits	# Bits
0	N/A	0	1

El valor máximo de la radiación UV se puede expresar con 11 bits, por lo que la carga útil normal puede ser expresada en ese mismo tamaño. Las distintas variaciones, se establecen en 11 bits cada una de ellas; debido a que puede existir una diferencia entre lecturas de esta longitud.

Humedad del suelo Según los estudios realizados por el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) [39], dependiendo de la época del año en la cual se realiza la medición, ya sea invierno o verano; la humedad en el suelo (medida en Cb) tiene un cambio considerable. En época lluviosa se encuentra en el rango de 0 a 10Cb, mientras que en periodos secos el valor varía entre 60 y 80Cb. Esto se debe a las lluvias y un decrecimiento en la cantidad de sol reflejadas en distintas zonas del país.

Con el fin de representar esta variable dentro del protocolo VMTPv2, se utilizan los valores máximos y mínimos registrados dentro del país. Los mismos que se detallan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Tamaño de la variable humedad del suelo.

V. Máximo (Cb)	Transformación	Bits	# Bits
80	N/A	1010000	7
V. Mínimo (Cb)	Transformación	Bits	# Bits
0	N/A	0	1

De acuerdo a lo expuesto, el valor máximo de la humedad del suelo se define con 7 bits, por lo que la carga útil normal puede ser definida en ese mismo tamaño. Las distintas variaciones, se establecen en 5 bits cada una de ellas; debido a que puede existir una diferencia entre lecturas de esta longitud.

Posteriormente, al trabajar con los valores entregados por cada uno de los sensores y almacenar las lecturas cada 5 minutos en un rango de una hora; se determina el tamaño que cada variable dentro de la trama a ser enviada. Es importante mencionar que, en una hora, existen 12 lecturas (si se las realizan cada 5 minutos); la primera corresponde a la carga útil normal y las once restantes son las variaciones.

Siguiendo este análisis, se establece que para los sensores de precipitación y humedad del suelo; el tamaño dentro de la trama es de 8 bytes. En el caso de la temperatura del suelo, se tiene un valor de 10 bytes. Para la variable del nivel de agua, debido a que pueden existir grandes variaciones, se establece un valor de 12 bytes. De igual manera, la temperatura y humedad externa se definen dentro de la trama con 14 bytes. Finalmente, la radiación solar está representada con 20 bytes.

4.5.2. Decodificación

Un paso antes de empezar la decodificación, es importante notar que la trama real enviada es la cifrada mediante AES-128. Esta trama consta de 32 bytes por parte del nodo nivel de agua y 48 bytes para los dos mensajes del nodo multiparamétrico. Los nodos envían los datos, los cuales son autenticados en el TTN mediante credenciales ABP.

Como se detalló anteriormente, los mensajes que llegan al TTN se encuentran cifrados, lo que garantiza la seguridad durante la transmisión. La trama (ver Figura 4.13 y Figura 4.14), fue decodificada mediante el procedimiento que se describe en el Anexo B.

Por ejemplo, el nodo “Nivel de Agua” tiene 20 bytes, distribuidos en: un byte para el nivel de batería, un byte para la bandera del sensor de nivel de agua, dos bytes para la marca de tiempo, dos bytes para el sensor de temperatura y humedad, y por último, doce bytes para el sensor nivel de agua.

Tabla 4.7: Tamaño del mensaje del nodo Nivel de Agua.

Sensor	Numero Bytes
Nivel de Batería	1
Banderas de Sensores	1
Marca de Tiempo	2
Temperatura	2
Humedad	2
Nivel de Agua	12
TOTAL	20

En el caso del Multiparamétrico, este se divide en dos mensajes, ya que no es posible enviar la información de los ocho sensores en uno solo por las limitaciones del protocolo LoRaWAN. El primer mensaje esta compuesto de 44 bytes, estructurados de la siguiente manera: un bytes para el nivel de batería, dos bytes para la marca de tiempo, tres bytes para las distintas banderas, dos bytes para la humedad interna, ocho bytes para la humedad del suelo, catorce bytes para la temperatura y humedad externa.

Tabla 4.8: Tamaño del primer mensaje del nodo Multiparamétrico.

Sensor	Número Bytes
Nivel de Batería	1
Marca de Tiempo	2
Humedad Interna	2
Banderas de Sensores	3
Humedad de Suelo	8
Temperatura Externa	14
Humedad Externa	14
TOTAL	44

El segundo mensaje está definido por 45 bytes, distribuidos de esta forma; dos bytes correspondientes a la marca de tiempo y la temperatura interna, tres bytes para las

distintas banderas, ocho bytes de lluvia, diez bytes para la temperatura del suelo y veinte bytes para la radiación solar.

Tabla 4.9: Tamaño del segundo mensaje del nodo Multiparamétrico.

Sensor	Número Bytes
Marca de Tiempo	2
Temperatura Interna	2
Banderas de Sensores	3
Lluvia	8
Temperatura del Suelo	10
Radiacion Solar	20
TOTAL	45

De acuerdo al orden y de la cantidad de bytes que son recibidos en la plataforma TTN, se separan las variables para ser transformadas a un formato legible para el usuario que es el decimal.

4.6. Conclusiones

La configuración de los diferentes dispositivos (nodos, Gateway y servidor) se realizó con la finalidad de una comunicación eficiente y de calidad entre cada uno de ellos (Sección 4.2).

La implementación y el diseño de las diferentes variables meteorológicas se realizaron mediante la información obtenida del equipo DAVIS Vantage Pro2 Plus. Para optimizar el tamaño de la trama de datos, se toman como referencia los valores de las distintas variables meteorológicas tanto a nivel nacional como a nivel mundial. Este estudio se elaboró con el objetivo de mejorar la eficiencia tanto en el protocolo de comunicación, como en el consumo energético de los dispositivos involucrados.

Resultados y discusión

En este capítulo se presenta los resultados de las evaluaciones de transferencia de datos entre los nodos y el Gateway. Además, se analiza el consumo de datos del módulo GSM/GPRS modelo SIM800L. Como punto final, se verifica el ahorro energético utilizando el protocolo propuesto.

5.1. Transmisión

Para evaluar el funcionamiento del protocolo VMTPv2 se realizaron varias pruebas de transmisión en campo. Estas pruebas fueron realizadas para validar los diferentes escenarios a los que podría estar expuesta la red. Las pruebas se realizaron alrededor de la montaña de Monjas por ser un terreno con topografía variada.

Cabe mencionar que se utiliza el índice RSSI, que es una escala de referencia (en relación con 1 mW) para medir el nivel de potencia de las señales recibidas por un dispositivo en las redes inalámbricas, generalmente la escala se expresa dentro de valores negativos; cuanto más negativo, mayor pérdida de señal. [40].

Finalmente, se realizan comparaciones entre cada experimento para proporcionar un modelo preciso de la red y, lo que es más importante, del protocolo propuesto, que ahora se puede utilizar de forma genérica para enviar datos a través de una red LoRaWAN.

El PROMAS recolecta información de las estaciones meteorológicas de la Universidad de Cuenca cada 5 minutos, por lo que para el análisis se utilizó este como tiempo de lectura de sensores y para el envío de datos un tiempo de 60 minutos.

En la Figura 5.1 se puede observar la topografía de la zona en donde se implementó la red y en donde se realizaron las distintas pruebas que se exponen a continuación.

En la Tabla 5.1 se detallan los valores del índice RSSI obtenidos en las distintas pruebas realizadas.

Según las especificaciones del dispositivo Lopy4 (Anexo D), posee una sensibilidad cercana a los -126dBm en referencia al índice RSSI, y como se puede observar en la Tabla 5.1, la primera prueba de transmisión se realizó a una distancia de 200m (Anexo



Figura 5.1: Topografía de la zona.

Tabla 5.1: Valores del índice RSSI obtenidos en las distintas pruebas.

Medición	Distancia (m)	RSSI (dBm)
1	200	-70
2	500	-85
3	1000	-86
4	1500	-96
5	2000	-102
6	2500	-98
7	3000	-103
8	3500	-98

E). La medición del índice RSSI alcanzó un valor de -70 , por lo que la señal llega con una potencia adecuada hacia el Gateway.

Finalmente, se utiliza una distancia entre los nodos y el Gateway de 3500m, tal como se muestra en el Anexo E. A esta separación se tiene un valor de RSSI cercano a los -98 . Lo que indica que la potencia de la señal en la recepción es baja, pero los datos se reciben y son subidos a Internet sin inconvenientes.

En la Figura 5.2 se muestra una gráfica comparativa del nivel de RSSI para cada una de las distancias antes descritas.

5.2. Configuración de la red a una frecuencia de 433Mhz

Otra prueba desarrollada en este trabajo de titulación, fue la implementación de toda la red usando la frecuencia de 433MHz. Esto se llevó a cabo con la finalidad de establecer una red con baja interferencia con relación a sistemas que trabajan a fre-

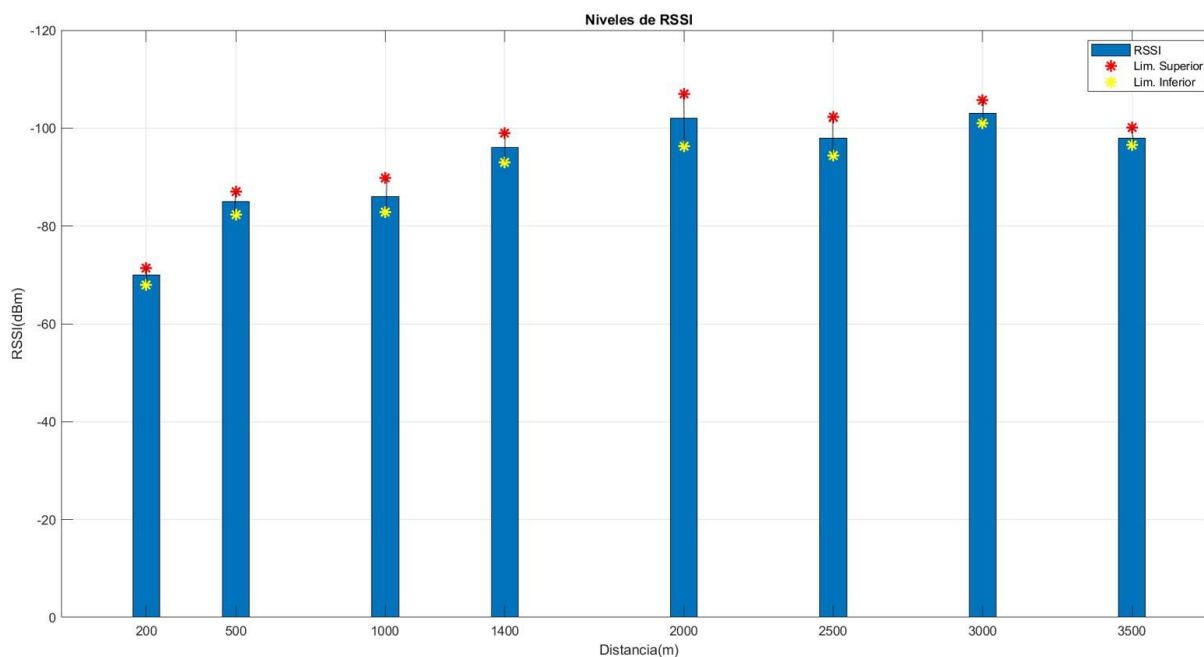


Figura 5.2: Niveles de RSSI con intervalo de confianza del 95 % de confiabilidad.

cuencias cercanas a los 915MHz, además de aumentar el rango de transmisión de cada uno de los nodos.

Al momento de establecer la red con este parámetro, se encontraron varias dificultades, las cuales se exponen a continuación:

- **Transmisión de Paquetes:** Con los nodos y Gateway trabajando a una frecuencia de 433MHz, se realizó la transferencia de información con los mismos parámetros antes mencionados: tiempo de lectura de sensores de 5 minutos y para el envío de datos un tiempo de 60 minutos. Se observó que, de cada dos paquetes enviados, se recibía uno solo, e incluso ningún paquete. Luego de varios experimentos y una extensa investigación, se encontró que esta versión de los dispositivos LoPy4, no trabaja de manera eficiente a esta frecuencia.
- **Consumo de Batería:** La duración de la batería alcanza un rango de entre 10 y 12 días. Lo que provoca que la red tenga un menor tiempo de vida a esta frecuencia para este tipo de aplicación.

Debido a estos obstáculos, implementar la red a esta frecuencia no es lo adecuado. Es por ello que a lo largo del documento, únicamente se hace referencia a la frecuencia de 915MHz.

5.3. Comparación de protocolos con respecto al número de bytes transmitidos

En esta sección se compara el funcionamiento del protocolo VMTPv2, con protocolos existentes; mediante el envío de datos durante un día con la finalidad de obtener una visión más clara acerca de la cantidad de bytes transmitidos por cada uno de ellos. En el primer escenario, se transmiten los datos mediante protocolo de línea base. En el segundo escenario, el envío de datos se realiza mediante el protocolo VMTPv2, en el tercer escenario los datos se transmitirán mediante VMTPv1. Finalmente, la transmisión se realiza a través de Cayenne LPP.

Para los casos antes mencionados, se utiliza la información capturada cada 5 minutos durante un día, teniendo un total de 288 lecturas para el análisis.

Cabe mencionar que Cayenne, VMTPv1 y el programa de línea base, no transmiten la información acumulada, únicamente la lectura en ese instante; lo que provoca que la cantidad de datos enviados al final del día, sea mayor a la del protocolo VMTPv2, que envía los datos recolectados cada cierto tiempo.

En el caso del nodo multiparamétrico, utilizando el protocolo VMTPv2 (2928 bytes diarios) reduce la trama 4, 3 y 2 veces más; con respecto a los protocolos Cayenne LPP, línea base y VMTPv1 (ver Figura 5.3).

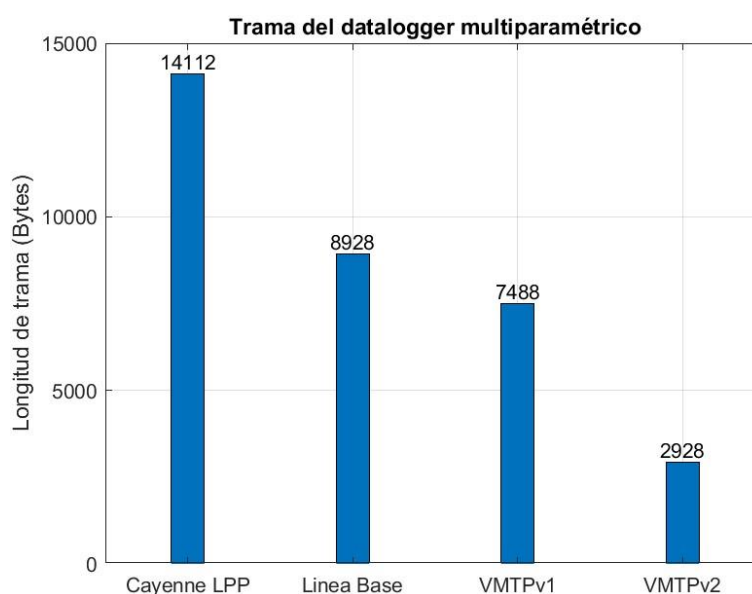


Figura 5.3: Total de bytes enviados usando los protocolos: Cayenne, Línea base, VMTPv1 y VMTPv2 (AES-128) desde el nodo multiparamétrico durante 1 día.

De igual manera, para el nodo nivel de agua se obtiene una reducción de la trama de datos de 8, 5 y 6 veces más en relación a los protocolos Cayenne LPP, línea base y VMTPv1 (ver Figura 5.4).

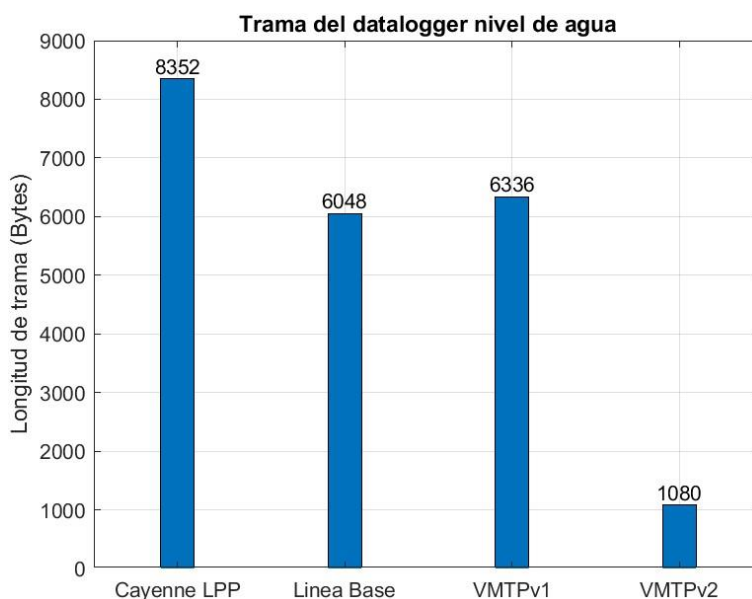


Figura 5.4: Total de bytes enviados usando los protocolos: Cayenne, Línea base, VMTPv1 y VMTPv2 (AES-128) desde el nodo nivel de agua durante 1 día.

5.4. Consumo de datos de la tarjeta SIM

La información con la que se realizaron las diferentes pruebas, fue proporcionada por cada nodo de la red; utilizando un tiempo de lectura de sensores de 5 minutos y envío de la información cada 60 minutos. El valor del consumo de datos es de alrededor 20000 bytes por día (conformado por la trama y el cifrado), este valor se obtuvo a través de la tarjeta SIM de Claro y de la aplicación que posee esta empresa para los dispositivos móviles. Se colocó un plan de internet y se verificó al transcurso de 24 horas cuantos bytes se utilizaron para enviar la información desde el Gateway hacia el servidor.

Para la estimación del consumo total de bytes en un lapso de 30 días, con el objetivo de entregar un valor aproximado del consumo de datos de la tarjeta SIM utilizada, se emplea el valor definido anteriormente en la ecuación 5.1; el cual es enviado a través del módulo GSM SIM800L.

$$\frac{\text{Consumo Total de Bytes}}{\text{dia}} \times 30 = 20000 \times 30 = 0.600[\text{M Bytes}] \quad (5.1)$$

El resultado de este calculo indica que al utilizar el protocolo VMTPv2, el consumo de datos de la tarjeta SIM en un lapso de 30 días es cercano a los 0.600 MBytes. Por lo tanto, no es necesario poseer un gran plan de datos, ni gastos económicos excesivos por parte del administrador de la red.

5.5. Consumo energético

Para este análisis, se toma como referencia la propuesta descrita en [31], en donde se emplea una fuente de voltaje (batería), seguido del sensor de corriente INA219 conectado en serie al circuito del cual se desea realizar la medición (en este caso, cada uno de los nodos y el Gateway). El sensor necesita de un microcontrolador para su funcionamiento, razón por la cual se utiliza un Arduino Uno. En la Figura 5.5, se observa la configuración antes descrita, que entrega la corriente instantánea en (mA) que consumen los diferentes dispositivos.

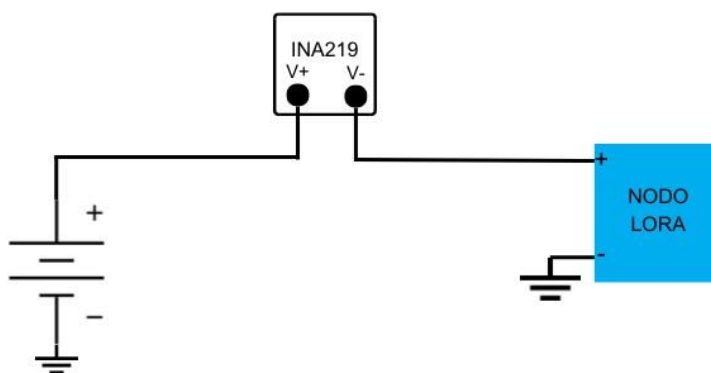


Figura 5.5: Montaje realizado para medir la corriente instantánea.

Se presentan tres diferentes escenarios en donde se analiza el consumo de corriente, los cuales son:

- Encendido y sincronización.
- Modo deep sleep y captura de datos.
- Transmisión de datos.

Este estudio fue realizado en cada uno de los nodos y en el Gateway, capturando los valores de corriente cada 1 ms por parte del sensor INA219.

5.5.1. Nodo Nivel de Agua

- Encendido y sincronización: El nodo al encenderse posee un pico de corriente de 400 mA, posteriormente se estabiliza e ingresa al modo idle (aquí consume alrededor de 55mA). En la siguiente etapa inicializa la red LoRa y envía el mensaje de sincronización hacia el Gateway, donde se observa un nivel de corriente de alrededor de 173 mA. En la Figura 5.6 se puede evidenciar lo antes descrito.

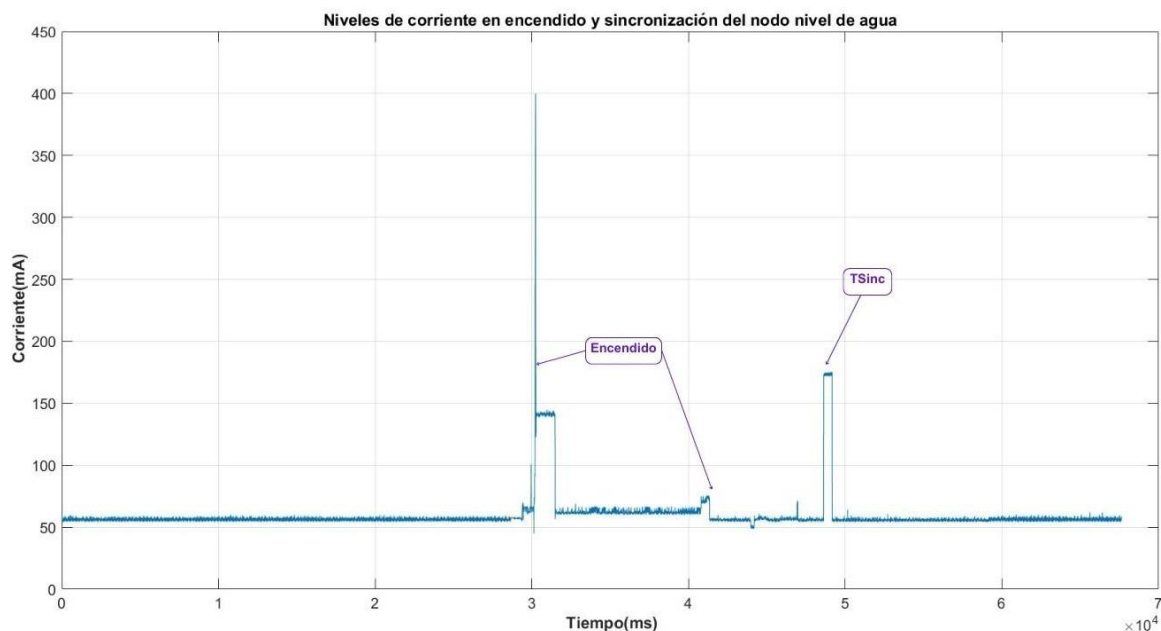


Figura 5.6: Niveles de corriente en encendido y sincronización del nodo nivel de agua.

- Modo deep sleep y captura de datos: Cuando el dispositivo se encuentra en el modo deep sleep, consume un valor promedio de 0.15 mA. Al momento de pasar de este modo al siguiente, existe un pico de aproximadamente 250 mA y ya en la captura de datos se tiene un nivel de corriente cercano a los 55 mA, que dura alrededor de 1.2 minutos. Después de este tiempo, el dispositivo entra nuevamente en modo deep sleep hasta la siguiente captura, que en este caso se realiza dentro de 5 minutos (ver Figura 5.7).

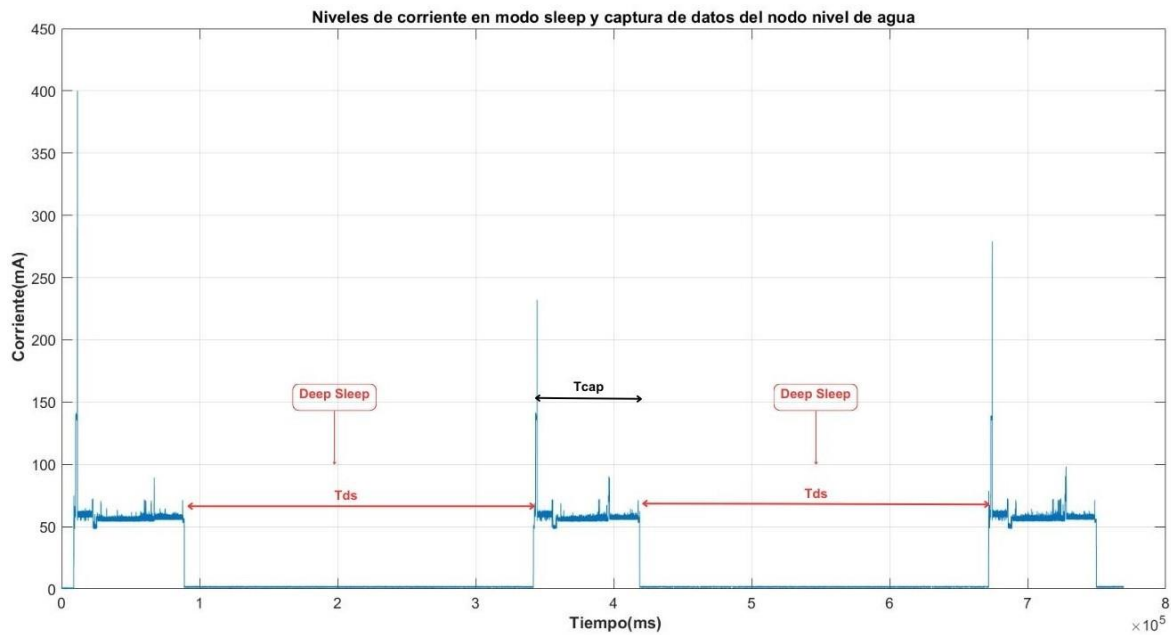


Figura 5.7: Niveles de corriente en modo deep sleep y captura de datos del nodo nivel de agua.

- **Transmisión de datos:** El tercer escenario consta de la etapa de envío de datos hacia el Gateway, la cual posee un nivel de corriente cercano a los 175 mA. Es importante mencionar que antes de transmitir la información, el dispositivo se encuentra en modo deep sleep y realiza una última lectura por parte de los sensores, es por eso que la gráfica muestra dicho procedimiento (analizado previamente). El tiempo de transmisión de los datos es cercano a los 265 ms (ver Figura 5.8).

5.5.2. Nodo multiparamétrico

- **Encendido y sincronización:** El nodo al encenderse posee un pico de corriente de 400 mA, posteriormente se estabiliza e ingresa al modo idle (aquí consume alrededor de 55mA). En la siguiente etapa inicializa la red LoRa y envía el mensaje de sincronización hacia el Gateway, donde se observa un nivel de corriente de alrededor de 175 mA. En la Figura 5.9 se puede evidenciar lo antes descrito.
- **Modo deep sleep y captura de datos:** Cuando el dispositivo se encuentra en el modo deep sleep, consume un valor promedio de 0.15 mA. Al momento de

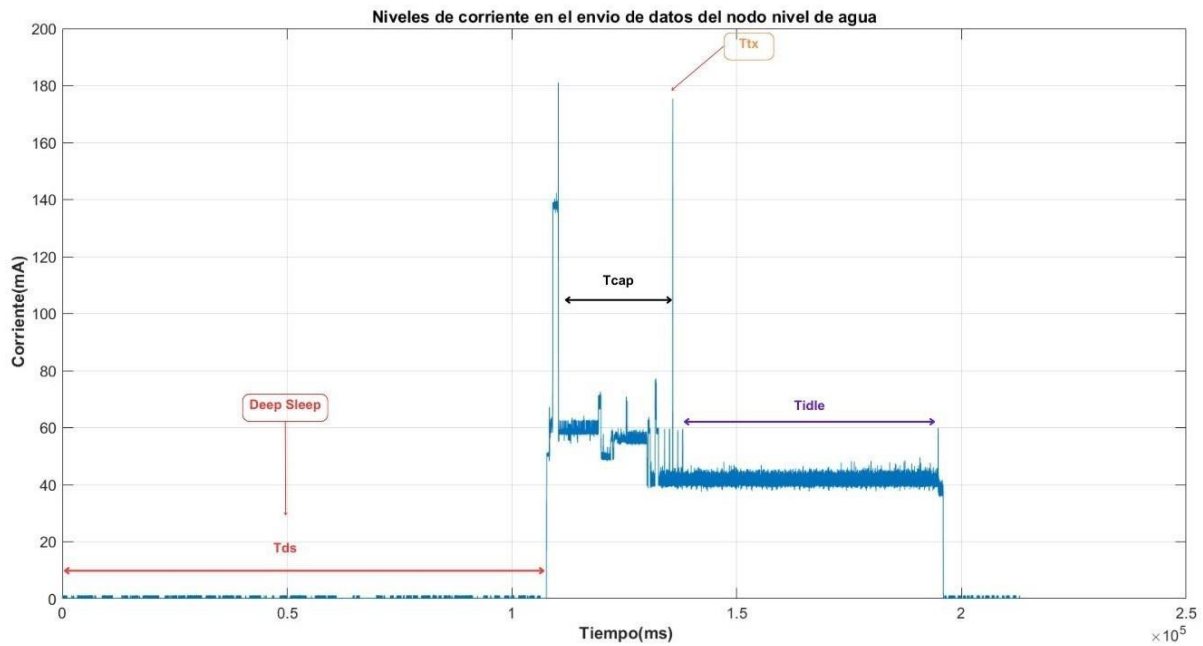


Figura 5.8: Niveles de corriente en el envío de datos del nodo nivel de agua.

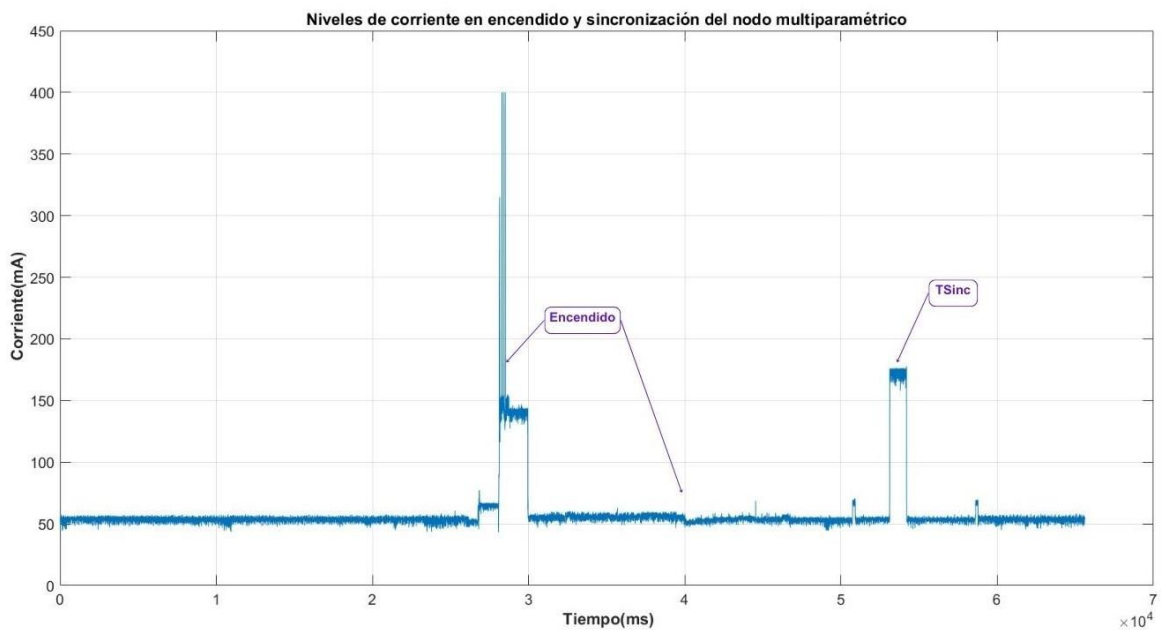


Figura 5.9: Niveles de corriente en encendido y sincronización del nodo multiparamétrico.

pasar de este modo al siguiente, existe un pico de aproximadamente 400 mA y ya en la captura de datos se tiene un nivel de corriente cercano a los 60 mA, que dura alrededor de 1.3 minutos. Después de este tiempo, el dispositivo entra nuevamente en modo deep sleep hasta la siguiente captura, que en este caso

se realiza dentro de 5 minutos (ver Figura 5.10).

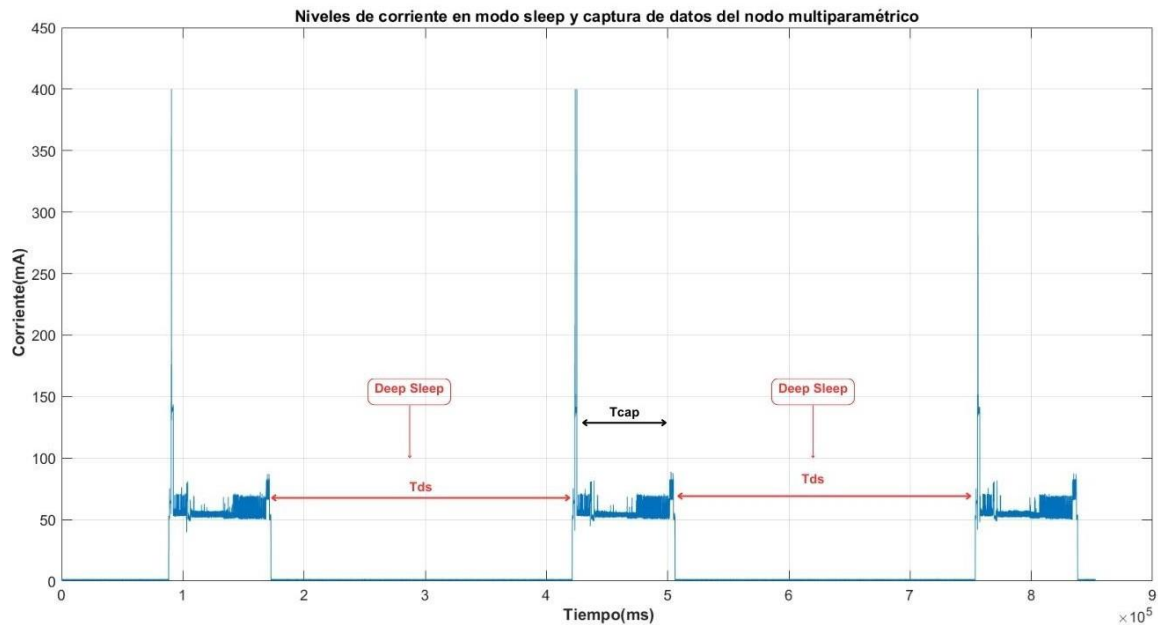


Figura 5.10: Niveles de corriente en modo sleep y captura de datos del nodo multiparamétrico.

- Transmisión de datos: El tercer escenario consta de la etapa del envío de datos hacia el Gateway, la cual posee un nivel de corriente cercano a los 176 mA. Es importante mencionar que antes de transmitir la información, el dispositivo se encuentra en modo deep sleep y realiza una última lectura por parte de los sensores, es por eso que la gráfica muestra dicho procedimiento (analizado previamente). El tiempo de transmisión de los datos es cercano a los 380 ms, una cantidad mayor a la del caso anterior. Esto se debe a que por la cantidad de sensores, este nodo envía dos mensajes hacia el Gateway (ver Figura 5.11).

5.5.3. Gateway

- Encendido y sincronización: El Gateway al encenderse posee un pico de corriente de 450 mA, posteriormente se estabiliza e ingresa al modo idle (aquí consume alrededor de 145 mA). En la siguiente etapa, inicializa la red LoRa, conjuntamente con la sincronización de los nodos con una corriente cercana a los 193 mA. Posteriormente, realiza la conexión hacia internet mediante el

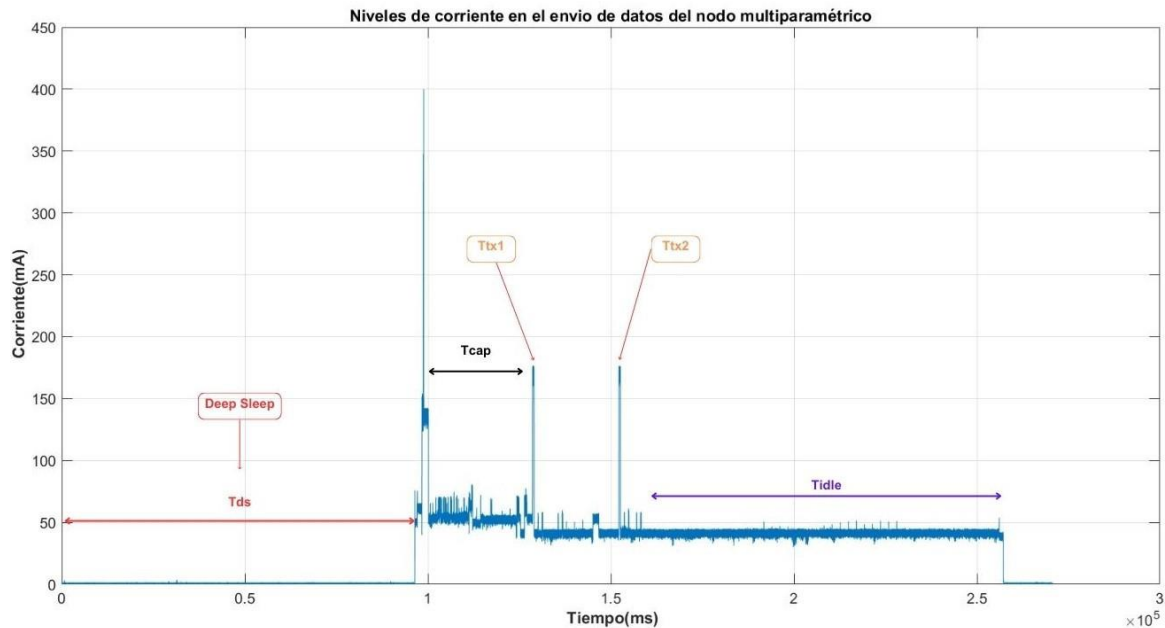


Figura 5.11: Niveles de Corriente en el envío de datos del nodo multiparamétrico.

SIM800L; donde posee un consumo aproximado de 525mA. En la Figura 5.12 se puede evidenciar lo antes descrito.

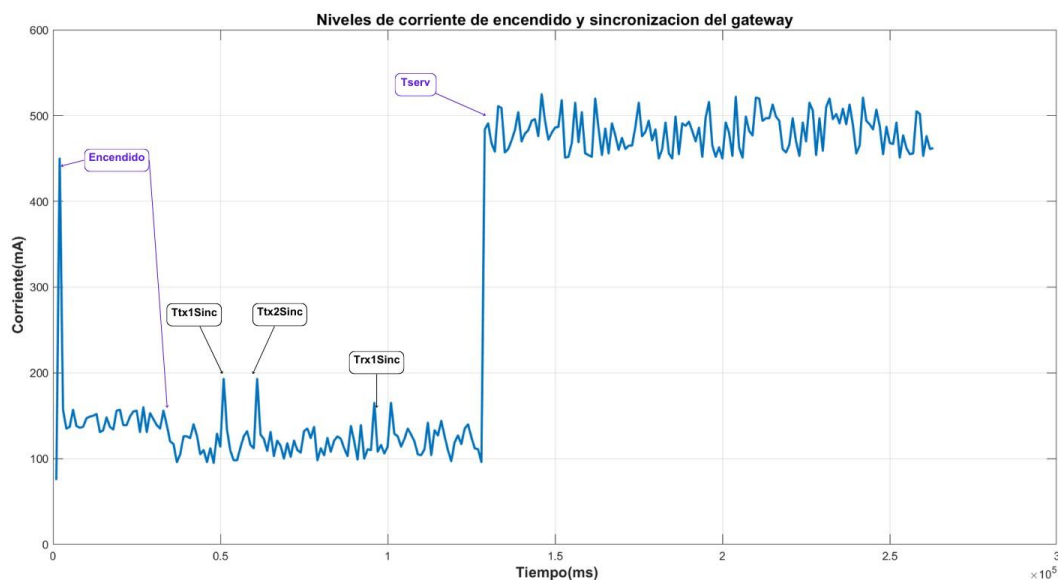


Figura 5.12: Niveles de corriente en encendido y sincronización del Gateway

- Recepción de datos: La segunda etapa consta de la recepción de mensajes de los distintos nodos. El dispositivo al prenderse, levanta la red LoRa para posteriormente colocarse en modo idle en espera de la información de los sensores.

El consumo promedio en esta etapa alcanza los 155 mA . Es importante mencionar que antes de recibir la información, el dispositivo se encuentra en modo deep sleep (3.5mA de consumo) hasta cumplir con el tiempo de transmisión definido por el usuario (ver Figura 5.13).

- Transmisión de datos: El consumo promedio en esta etapa alcanza los 550 mA, dado que se realiza la conexión a internet mediante la red GSM/GPRS. (ver Figura 5.13)

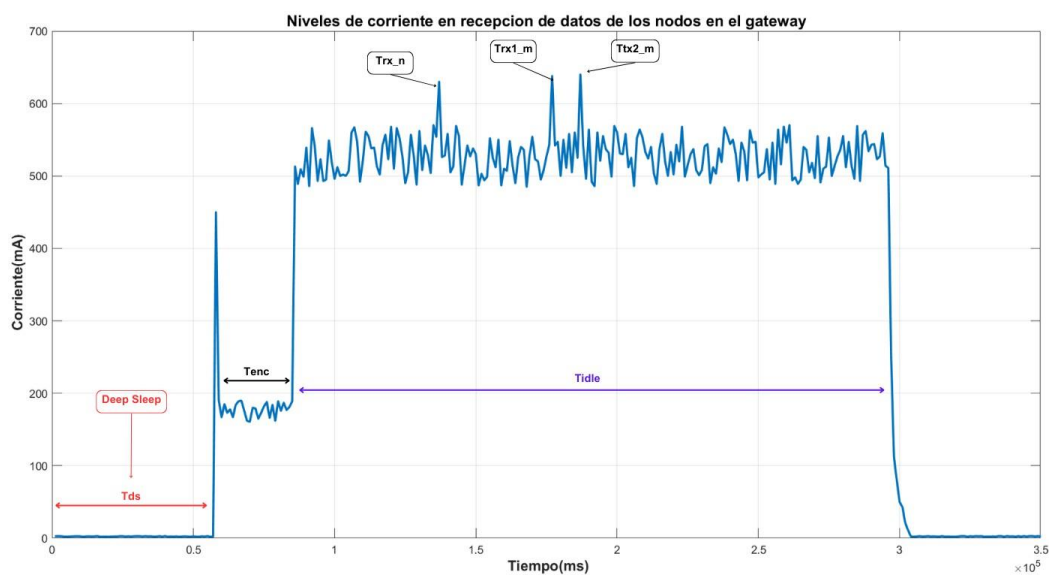


Figura 5.13: Niveles de Corriente en la recepción de mensajes del gateway

5.5.4. Estimación del consumo energético

Ya con los datos obtenidos a través del sensor INA219, de la sección 5.14, es posible obtener los valores de consumo energético en los diferentes modos de operación, estos datos se presentan en la tabla 5.5.4.

Tabla 5.2: Consumo energético de los diferentes modos de operación, correspondiente a los nodos y Gateway

Modos de Operación	Nivel de Agua	Multiparamétrico	Gateway
Encendido y Sincronización	110mA	183mA	365mA
Deep sleep	0.15mA	0.15mA	3.5mA
Captura de datos	55mA	60mA	-
Transmisión	175mA	176mA	550mA
Recepción	-	-	155mA

Con estos valores y los tiempos de operación, es posible detallar el consumo de energía durante un día. Para el nodo nivel de agua, se obtiene un consumo diario de 274 mA; logrando así estimar el tiempo de funcionamiento (con una batería de 5000 mAh) de alrededor de 18 días (420 horas). De igual manera, para el nodo multiparamétrico que posee un consumo diario de 265 mA, el tiempo de vida de la batería es cercano a los 19 días (453 horas). Por último, el Gateway (batería de 6600 mAh) posee un consumo al día de 1012 mA, generando un tiempo de funcionamiento de aproximadamente 6.5 días (157 horas). (ver Figura 5.14).

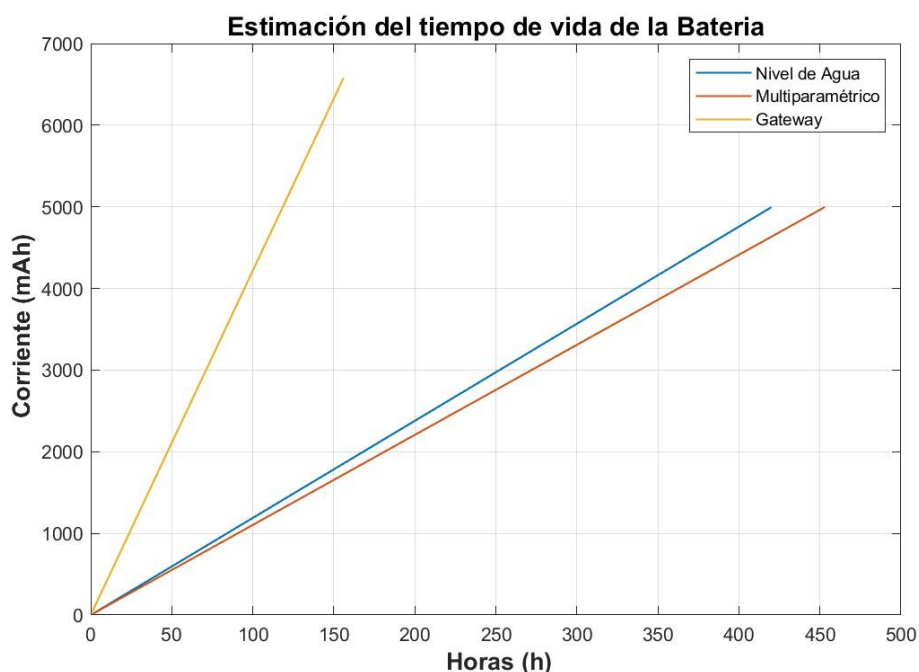


Figura 5.14: Estimación de tiempo de vida de la batería Amperaje vs Horas. Como

última prueba, se realiza la estimación del tiempo de vida de la batería de los nodos, utilizando la información del voltaje generada en la base de datos de Thingsboard durante 2 semanas. Es importante mencionar que, de manera similar a los análisis anteriores; para este experimento los nodos capturan los datos cada 5 minutos y los envían cada hora.

El análisis se planteó de la siguiente manera: una batería de litio de 3,7 V en buen estado tiene un voltaje máximo de 4,2 V y un voltaje mínimo de 2,75 V. Al analizar el voltaje del datalogger multiparamétrico en la base de datos, se observa un consumo de 0,1 V cada 33 horas; lo que significa que la batería tiene una duración cercana a los 21 días. De manera similar para el datalogger de nivel de agua, se aprecia que cada

23 horas consume alrededor de 0,1 V. Dando como resultado 15 días de duración de la batería para este nodo (ver Figura 5.15). Como se puede notar, la batería del nodo multiparamétrico tiene una mayor duración con respecto al datalogger de nivel de agua, esto se debe a que las baterías utilizadas en este último no son nuevas y, por ende, no tienen tiempos de vida similares.

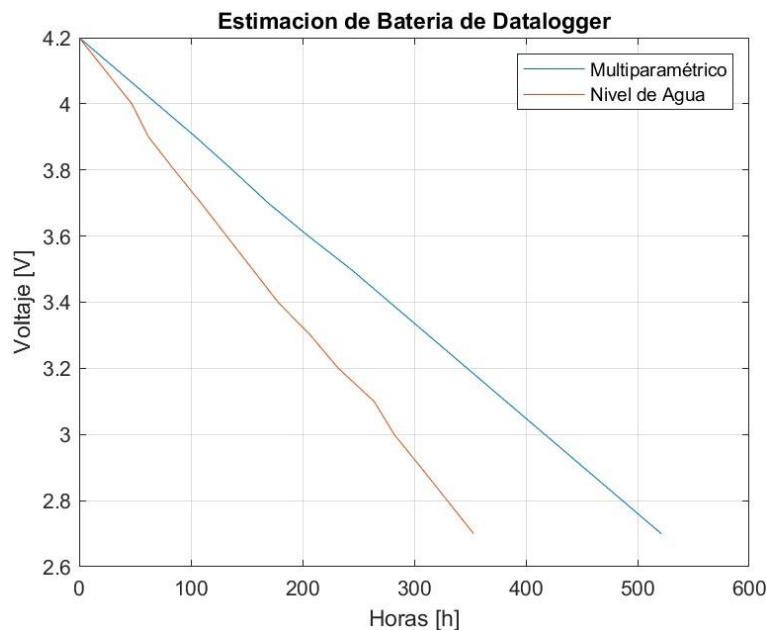


Figura 5.15: Estimación de tiempo de vida de la batería Voltaje vs Horas.

5.5.5. Consumo de energía de los diferentes protocolos

Por último se presenta el análisis del consumo de energía durante el lapso de 24 horas entre los diferentes protocolos (ver Figuras 5.16,5.17,5.18).

Como se puede observar en la Figura 5.16, el consumo de energía durante un día del protocolo VMTPv2 en el nodo nivel del agua, es de 273 mA. Lo que disminuye el consumo alrededor del 30 %, con respecto a los protocolos Cayenne, línea base y VMTPv1; que poseen un consumo cercano a los 392 mA.

De manera similar al caso anterior, en la Figura 5.17 se compara el consumo energético diario del protocolo VMTPv2 en el nodo multiparamétrico. Como se puede observar, VMTPv2 tiene un consumo cercano a los 264 mA, lo que se traduce a una disminución del 55 % con respecto a los demás protocolos: Cayenne (589 mA), línea base (587 mA) y VMTPv1 (587 mA).

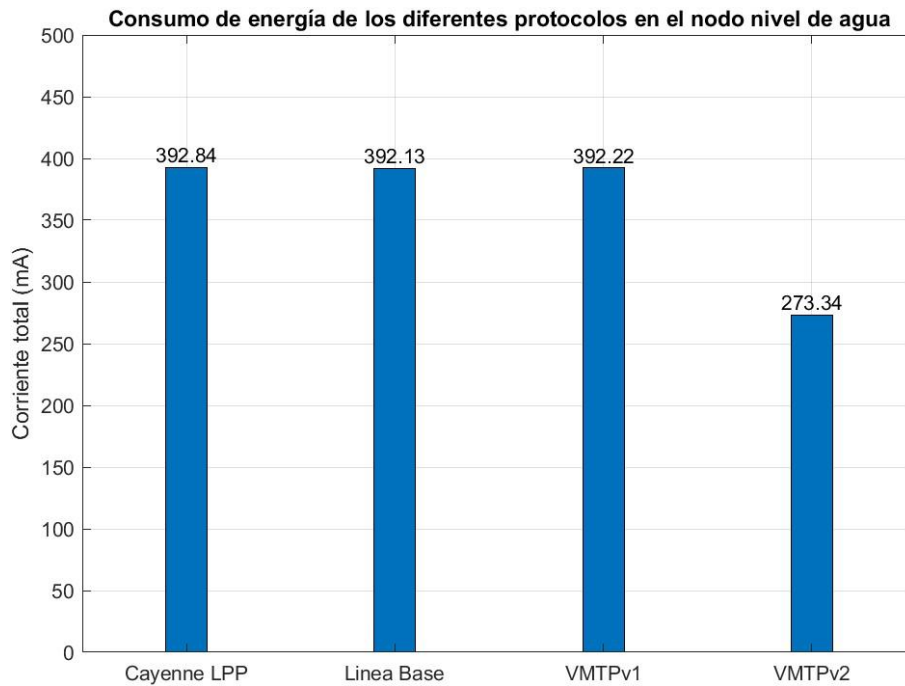


Figura 5.16: Consumo de energía de los diferentes protocolos (nodo nivel de agua)

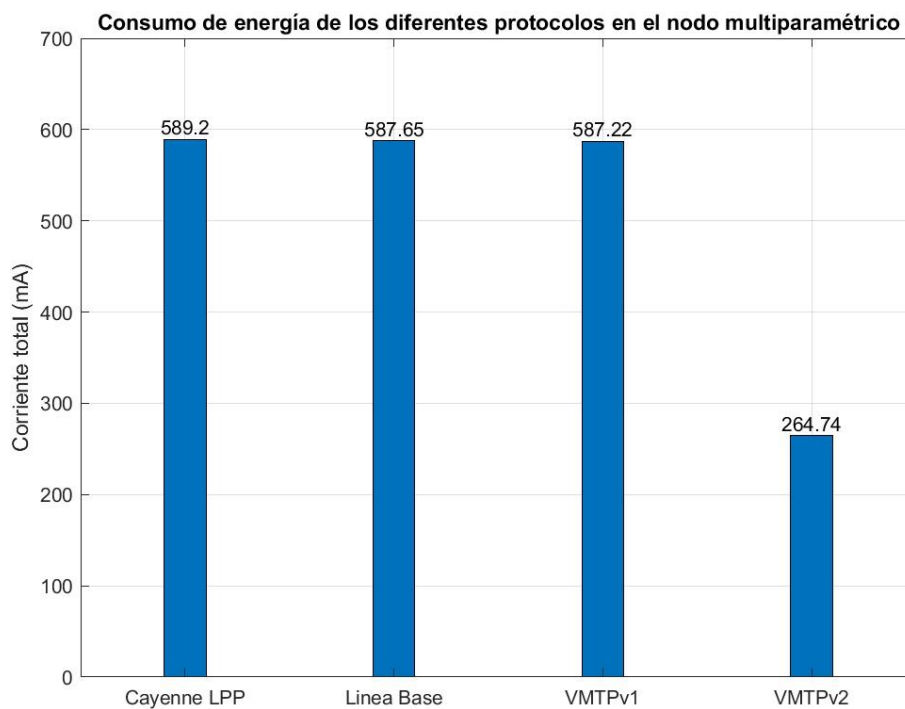


Figura 5.17: Consumo de energía de los diferentes protocolos (nodo multiparamétrico)

Finalmente, el consumo diario de energía del protocolo VMTPv2 en el Gateway es de 1012 mA. Lo que provoca una disminución cercana al 91 % con respecto a los protocolos Cayenne, línea base y VMTPv1; que consumen alrededor de 12144 mA en este mismo lapso de tiempo.

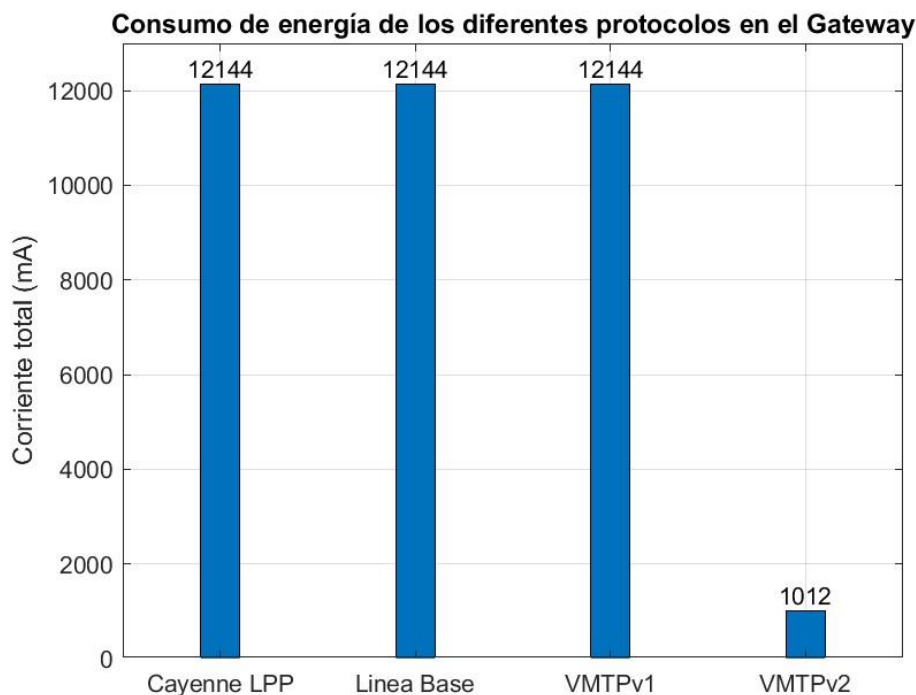


Figura 5.18: Consumo de energía de los diferentes protocolos (Gateway)

5.6. Conclusiones

En este capítulo, para asegurar que es una comunicación de calidad, se toma como referencia las diferentes mediciones del índice RSSI, las cuales devolvieron como resultado valores en donde la red recibe los datos de manera adecuada, ya que son cantidades menores a -126dBm (sensibilidad del receptor). Además, utilizar distancias de separación mayores a 4000 metros; hacen que el índice RSSI posea valores menores a los -100dBm . Lo que podría generar pérdida de paquetes durante la transmisión, ya que la sensibilidad del receptor se encuentra cercana a estos valores.

Otro punto de gran importancia dentro del desarrollo de este trabajo, fue la implementación de la red a una frecuencia de 433MHz. Lo que entregó como resultado una baja eficiencia, tanto en la transmisión de los datos como en el consumo de batería. Lo que da lugar a una red poco fiable, si se pretende que el envío de la información sea confiable y que el tiempo de vida de las baterías se prolongue varias semanas.

Tal como se pudo evidenciar, la trama de datos del protocolo VMTPv2 para el nodo multiparamétrico presenta una gran mejoría en comparación con Cayenne LPP, línea base y VMTPv1. Reduce la trama 4, 3 y 2 veces más, respectivamente. De igual

manera, para el nodo nivel de agua se obtiene una reducción de la trama de datos de 8, 5 y 6 veces más en relación a los protocolos Cayenne LPP, línea base y VMTPv1.

Con la información proporcionada por el sensor INA219, se pudo detallar el consumo de energía que posee este protocolo en cada una de las etapas y por cada uno de los dispositivos. Esto se lleva a cabo con la finalidad de realizar una estimación del tiempo de vida de las baterías y para realizar una comparación en términos de ahorro energético que posee el protocolo VMTPv2 con respecto a los protocolos antes mencionados.

En el caso del nodo multiparamétrico, se tiene una autonomía energética cercana a los 19 días (ya que consume diariamente un valor de 265 mA y se utiliza una batería de 5000 mA). Y al comparar el consumo diario de energía con los protocolos Cayenne LPP, línea base y VMTPv1; se obtiene un ahorro del 55 % con respecto a cada uno de ellos.

De manera similar, el nodo nivel de agua posee un tiempo de vida de la batería que llega a los 18 días (ya que consume diariamente un valor de 274 mA y se utiliza una batería de 5000 mA). Y al comparar el consumo diario de energía con los protocolos Cayenne LPP, línea base y VMTPv1; se obtiene un ahorro del 30 % con respecto a cada uno de ellos.

Finalmente, para el Gateway se tiene una autonomía en términos de energía que bordea los 7 días. Y al comparar el consumo diario de energía con los protocolos Cayenne LPP, línea base y VMTPv1; se obtiene un ahorro del 90 % con respecto a cada uno de ellos.

Al almacenar y enviar los datos cada cierto tiempo, el protocolo VMTPv2 ahorra energía de manera considerable por cada uno de los dispositivos (nodos y Gateway). De igual manera, existe una menor cantidad de bytes transmitidos al final del día; lo que reduce el consumo de datos móviles.

Conclusiones y recomendaciones

Este capítulo detalla cada una de las conclusiones originadas mediante el desarrollo de este trabajo. Además, se realiza una interpretación justificada de los resultados, las limitaciones que han existido durante el proceso y finalmente, sugiere vías para ampliar la investigación en el futuro.

6.1. Conclusiones

En el presente estudio, se diseñó e implementó un protocolo de capa de aplicación para la transmisión de datos hidrometeorológicos utilizando LoRaWAN. Este protocolo está configurado y programado para transmitir la información en un intervalo de tiempo establecido por el usuario. Además, el Gateway está sincronizado con cada uno de los nodos, de manera que no existan retrasos al enviar las mediciones de los sensores. Esta clase de WSN, brinda la solidez y escalabilidad necesarias para monitorear eventos repetitivos y aleatorios que afectan las diferentes variables meteorológicas, las cuales juegan un papel esencial en el estudio del clima.

La carga útil de las variables meteorológicas ha sido optimizada para transmitir la información de manera eficiente, reduciendo la cantidad de bytes. La asignación del número de bytes de cada variable se realizó con el propósito de facilitar el proceso de transmisión, sin dejar de lado la naturaleza de la misma. Además, se ha observado que una carga útil reducida, es decir, las variaciones de cada variable en un intervalo de tiempo determinado, desempeña un papel fundamental en la codificación de los datos, permitiendo generar tramas de datos más pequeñas (de 192 a 80 bytes en el nodo multiparamétrico y, de 72 a 18 bytes en el nodo nivel de agua). Esto contribuye a mejorar la eficiencia y la calidad de la información meteorológica.

La información recolectada por los nodos sensores es transmitida al Gateway y posteriormente retransmitida al servidor utilizando la tecnología GSM/GPRS. Esta elección se basa en la amplia cobertura que brinda esta tecnología, lo cual la hace altamente adecuada para implementaciones de este tipo. Gracias a su extensa cobertura, se garantiza una conexión confiable y estable entre los dispositivos y el servidor, permitiendo una transmisión eficiente de los datos recolectados.

Una de las características destacadas en esta implementación es que cualquier usuario puede acceder a la aplicación desde cualquier parte del mundo y observar en tiempo real diversas mediciones meteorológicas a través del servidor ThingsBoard. En esta plataforma, se desarrolló un panel de control (dashboard) diseñado específicamente para visualizar la información recibida.

Esta funcionalidad permite a los usuarios acceder de manera remota a los datos meteorológicos recopilados, lo que brinda flexibilidad y accesibilidad sin importar su ubicación geográfica. Mediante el panel de control en ThingsBoard, los usuarios pueden explorar y analizar de manera intuitiva las mediciones en tiempo real, facilitando una comprensión más profunda de las condiciones meteorológicas y sus variaciones.

Ajustar adecuadamente estos parámetros permite minimizar las interferencias, maximizar la cobertura de la red y optimizar la calidad de la señal. Además, proporcionar los valores correctos para la conexión del Gateway con la aplicación asegura una comunicación segura y confiable.

Tal como se pudo evidenciar en la sección 5, la trama de datos del protocolo VMTPv2 para el nodo multiparamétrico presenta una gran mejoría en comparación con Cayenne LPP, línea base y VMTPv1. Reduce la trama 4, 3 y 2 veces más, respectivamente. De igual manera, para el nodo nivel de agua se obtiene una reducción de la trama de datos de 8, 5 y 6 veces más en relación a los protocolos antes mencionados.

En términos de energía, para el caso del nodo multiparamétrico, se tiene una autonomía cercana a los 19 días (ya que consume diariamente un valor de 265 mA y se utiliza una batería de 5000 mA). Y al comparar el consumo diario de energía con los protocolos Cayenne LPP, línea base y VMTPv1; se obtiene un ahorro del 55 % con respecto a cada uno de ellos.

De manera similar, el nodo nivel de agua posee un tiempo de vida de la batería que llega a los 18 días (ya que consume diariamente un valor de 274 mA y se utiliza una batería de 5000 mA). Y al comparar el consumo diario de energía con los protocolos Cayenne LPP, línea base y VMTPv1; se obtiene un ahorro del 30 % en relación a cada uno de ellos.

Finalmente, para el Gateway se tiene una autonomía de la batería que bordea los 7

días. Y al comparar el consumo diario de energía con los protocolos Cayenne LPP, línea base y VMTPv1; se obtiene un ahorro del 90 % con respecto a cada uno de ellos.

En relación a las pruebas de transmisión presentadas al principio del Capítulo 5, se comprobó que la comunicación entre los nodos y el Gateway presenta valores mayores a -126 dBm (sensibilidad del receptor), lo que significa que la transferencia de datos se realiza sin inconvenientes. Esto se confirmó a través de las mediciones del índice RSSI. Sin embargo, al aumentar la distancia de separación a más de 4000 metros, el índice RSSI disminuye por debajo de -100dBm, por lo que para evitar pérdidas de paquetes; es conveniente colocar los dispositivos a distancias no mayores a la descrita.

Otro punto importante fue la implementación de la red en la frecuencia de 433MHz, la cual presentó inconvenientes en la transferencia de datos, con mensajes que no eran enviados correctamente o que no llegaban en su totalidad. También se observó un mayor consumo de energía. Estos problemas hacen que la red no sea viable con los dispositivos LoPy utilizados, ya que se busca una transmisión de datos confiable y una duración prolongada de las baterías.

6.2. Recomendaciones

Durante la implementación y el desarrollo de este protocolo, se han observado varios aspectos y consideraciones que se deben tener en cuenta para un correcto funcionamiento de la WSN.

- Al implementar los diferentes dispositivos en el sitio de estudio, el Gateway debe ser instalado en una ubicación que garantice línea de vista con los nodos sensores; esto se debe realizar para reducir la pérdida de paquetes.
- Para aumentar el tiempo de vida de la red, se recomienda instalar paneles solares y su correspondiente controlador de carga, en cada uno de los nodos. Además, esto alargaría el tiempo entre visitas a la zona de estudio, lo que se traduce en un ahorro de recursos económicos.
- Se recomienda sustituir los sensores de temperatura y humedad de cada uno

de los nodos, ya que estos han cumplido su tiempo de vida y presentan fallas al momento de realizar las mediciones. Para solventar de alguna manera este inconveniente, se han realizado varias lecturas y mediante el uso de medias de tendencia central como la moda, se obtienen los valores para este tipo de sensores.

6.3. Trabajos futuros

Al concluir el desarrollo de este protocolo para la WSN expuesta, surgieron diversos tópicos en los cuales se podría prestar atención con la finalidad mejorar el rendimiento en un futuro.

- En la actualidad, el estándar LoRaWAN se limita a una topología de red en estrella. Sin embargo, uno de los aspectos clave que añadiría un valor significativo a este trabajo es la implementación de una comunicación multisalto desde los nodos hasta el Gateway. La introducción de una comunicación multisalto permitiría superar las limitaciones de alcance de la topología en estrella. Los nodos podrían transmitir los datos a través de múltiples saltos entre otros nodos intermedios, hasta alcanzar finalmente el Gateway. Esto ampliaría el rango de cobertura y permitiría la comunicación en áreas más extensas o en entornos con obstáculos físicos que dificulten la transmisión directa. Hay que tomar en cuenta si se desea realizar esta implementación, que por las limitaciones del tamaño de paquetes en LoRaWAN (52 bytes) se tendrían que dividir las tramas en sub-tramas, para que en cada salto no se sobrepase el límite de longitud que puede tener un mensaje al utilizar este protocolo.
- Debido a que la empresa que fabricaba los módulos LoPy4 ha entrado en proceso de liquidación, la adquisición de estos dispositivos ya no es posible. Por lo que se plantea implementar la red y el protocolo en otros dispositivos que admitan la tecnología LoRa, conjuntamente con su protocolo LoRaWAN.

Referencias

- [1] D. C. Ruiz-Ayala, C. A. Vides-Herrera, y A. Pardo-García, “Monitoreo de variables meteorológicas a través de un sistema inalámbrico de adquisición de datos,” *REVISTA DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN*, vol. 8, num. 2, p. 333, jun 2018.
- [2] J. P. Narvárez Bernal y J. B. Tenesaca Quilambaqui, “Diseño e implementación de un protocolo de capa de aplicación para la transmisión de datos hidrometeorológicos utilizando tecnología LoRa,” Universidad de Cuenca, apr 2019. [En línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/32407>
- [3] M. K. Singh, S. I. Amin, S. A. Imam, V. K. Sachan, y A. Choudhary, “A survey of wireless sensor network and its types,” *Proceedings - IEEE 2018 International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking, ICACCCN 2018*, pp. 326–330, 10 2018.
- [4] E. Migabo, K. Djouani, A. Kurien, y T. Olwal, “A Comparative Survey Study on LPWA Networks: LoRa and NB-IoT,” *Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC)*, num. November 2017, pp. 29–30, 2017.
- [5] Q. M. Qadir, T. A. Rashid, N. K. Al-Salihi, B. Ismael, A. A. Kist, y Z. Zhang, “Low power wide area networks: A survey of enabling technologies, applications and interoperability needs,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 77 454–77 473, 2018.
- [6] MyDevices, “Cayenne Low Power Payload,” 2018. [En línea]. Disponible: <https://docs.mydevices.com/docs/lorawan/cayenne-lpphttps://mydevices.com/cayenne/docs/lora/#lora-cayenne-low-power-payload-data-types>
- [7] “Pycom - next generation internet of things platform.” [En línea]. Disponible: <https://pycom.io/>
- [8] S. Company, SIM800L Datasheet, 2013. [En línea]. Disponible: https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/SIM800L-Datasheet.pdf
- [9] M. User, UV & Solar Radiation Sensors. [En línea]. Disponible: www.davisinstruments.com

- [10] —, Rain Collector (# 6463 & 6463M). [En línea]. Disponible: www.davisinstruments.com
- [11] Soil Moisture Sensor (6440) & Stainless Steel Temperature Probe (6470) Installation Instructions. [En línea]. Disponible: www.davisinstruments.com.
- [12] “Ds18B20 temperature sensor hvac applications-gaimc.” [En línea]. Disponible: https://www.gaimc.com/products/ds18B20-temperature-sensor/DS18B20_temperature_sensor.html?gclid=Cj0KCQiAiJSeBhCCARIsAHnAzT9eXR4kRoTTO2JI9qpUiEDiCplID1YHjyBfFaCjPTqE-jjJQsEdMfcaAsi1EALw_wcB
- [13] Datasheet SHT1x (SHT10, SHT11, SHT15) Humidity and Temperature Sensor. [En línea]. Disponible: https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/SHT1x_datasheet.pdf.
- [14] T. Liu, Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302) Capacitive-type humidity and temperature module/sensor.
- [15] “What is thingsboard? | thingsboard community edition.” [En línea]. Disponible: <https://thingsboard.io/docs/getting-started-guides/what-is-thingsboard/>
- [16] Github - atom/atom: The hackable text editor. [En línea]. Disponible: <https://github.com/atom/atom>
- [17] F. J. Reyes Coellar y M. E. Tene Guamán, “Diseño de la arquitectura para transmisión de datos de los sensores de campo del PROMAS,” Universidad de Cuenca, 2014. [En línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/20911>
- [18] M. P. Morocho Gutama y J. J. Vázquez Patiño, “Prototipo de un dispositivo de adquisición, almacenamiento y transmisión de datos meteorológicos usando los transductores de la estación DAVIS 6162 Wireless Vantage Pro2 Plu,” Universidad de Cuenca, 2017. [En línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28600>
- [19] S. Placencia, F. Astudillo-Salinas, A. Vazquez-Rodas, L. I. Minchala, y J. Guaman, “Rainfall intensity datalogger system. Lopy4-based design and implementation,”

- PE-WASUN 2019 - Proceedings of the 16th ACM International Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks, pp. 45–50, 2019.
- [20] K. S. Piedra Orellana, “Diseño e implementación de un registrador de datos para la adquisición de datos pluviométricos,” Universidad de Cuenca, p. 109, 2020. [En línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/34858>
- [21] A. C. López Ochoa, “Diseño e implementación de un registrador de datos para la adquisición de información limnigráfica,” Universidad de Cuenca, apr 2019. [En línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/32561>
- [22] A. Vazquez-Rodas, F. Astudillo-Salinas, y L. I. Minchala, “Aplicación de tecnologías inalámbricas al monitoreo climatológico en la cuenca del Río Paute,” Revista de Investigación en Tecnologías de la Información, vol. 9, num. 17, pp. 89–96, jan 2021.
- [23] A. Heredia y P. Lucero, Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial orientado a OPC de arquitectura unificada. Universidad de Cuenca, 2021. [En línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/35875/1/TrabajodeTitulacion.pdf>
- [24] I. García Palomino y F. J. Hinojosa Pérez, “Desarrollo de red de sensores de irradiación solar,” 2019, trabajo de Fin de Grado, Universidad Complutense, Facultad de Informática, Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática, Curso 2018/2019. [En línea]. Disponible: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/56724/>
- [25] J. Andrés Muñoz Jiménez, C. Felipe, y M. Gómez, “Sistema de Medición de Variables Ambientales SIMEVAM,” Universidad de Antioquia, 2021. [En línea]. Disponible: <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/23108>
- [26] S. L. Cuadrado Coronel, “Aplicación de la tecnología IoT (Internet of Things) para la medición de variables meteorológicas en la agricultura sostenible la tecnología IoT (Internet of Things) con sensores de bajo

- costo, como herramienta de monitoreo de las variables meteorológicas temperatura y humedad del suelo para la optimización del recurso hídrico en la agricultura sostenible.” Escuela Politécnica Nacional, 2022. [En línea]. Disponible: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22946>
- [27] J. A. Rodríguez Sánchez y J. S. Rojas Gonzalez, “Diseño de un Nodo LoRa-GPS para Localización de Bicicletas Implementado en una Red LoRaWAN,” Ph.D. dissertation, 2021. [En línea]. Disponible: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/35661>
- [28] N. Pukrongta y B. Kumkhet, “The relation of LoRaWAN efficiency with energy consumption of sensor node,” Proceedings of the 2019 International Conference on Power, Energy and Innovations, ICPEI 2019, num. IcpEI, pp. 90–93, 2019.
- [29] A. Peruzzo y L. Vangelista, “A Power Efficient Adaptive Data Rate Algorithm for LoRaWAN networks,” International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC, vol. 2018-November, pp. 90–94, 2018.
- [30] S. Azogues, P. Biblián -Cantón Biblián, J. Gustavo, y L. Morocho, “Diseño e implementación de una red LPWAN para medir el consumo de agua potable domiciliaria utilizando la tecnología lora de bajo costo para la junta administrativa de agua del sector de Gulanza de la parroquia Biblián-cantón Biblián,” Universidad Católica de Cuenca, 2020. [En línea]. Disponible: <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/11917>
- [31] S. A. Cifuentes Carrasco, “ESTUDIO DE CONSUMO ENERGÉTICO PARA ALGORITMOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS EN REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS BAJO EL PROTOCOLO LORAWAN MEMORIA,” Ph.D. dissertation, 2021. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181783>
- [32] L. Alliance, “LoRaWAN 1.0.3 Regional Parameters,” Inc, Jan, vol. 1.1, num. Released, p. 72, 2018.
- [33] INAMHI, “Red de estaciones automáticas | inamhi,” 2021. [En línea]. Disponible: <http://186.42.174.236/InamhiEmas/>

- [34] Y. Quilcaille, L. Gudmundsson, L. Beusch, M. Hauser, y S. I. Seneviratne, “Showcasing mesmer-x: Spatially resolved emulation of annual maximum temperatures of earth system models,” *Geophysical Research Letters*, vol. 49, p. e2022GL099012, 9 2022. [En línea]. Disponible: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2022GL099012><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2022GL099012><https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2022GL099012>
- [35] “Los lugares más húmedos del mundo - civitatis magazine.” [En línea]. Disponible: <https://www.civitatis.com/blog/lugares-mas-humedos-mundo/>
- [36] Conciencia, “Lugares más lluviosos del planeta.” [En línea]. Disponible: <https://www.concienciaeco.com/2018/11/06/sabes-cuales-son-los-9-lugares-mas-lluviosos-del-planeta/>
- [37] Meteored, “Niveles más altos de radiación ultravioleta.” [En línea]. Disponible: <https://www.tiempo.com/noticias/ciencia/donde-se-registran-los-niveles-mas-altos-de-radiacion-ultravioleta.html>
- [38] Índice ultravioleta (iuv) - ideam. [En línea]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/indice-ultravioleta-iuv->
- [39] INIAP, “Métodos para la determinación de humedad en el suelo,” INIAP, 2017.
- [40] L. D. González, “Test y despliegue de tecnología de comunicaciones LoRa para aplicaciones de Internet of Things,” Universidad Politécnica de Madrid, pp. 1–94, 2019. [En línea]. Disponible: <https://oa.upm.es/54465/>

Anexo A: Configuración de dispositivos

A.1. Instalación y configuración del servidor LoRaWAN TTN

A.1.1. Instalación

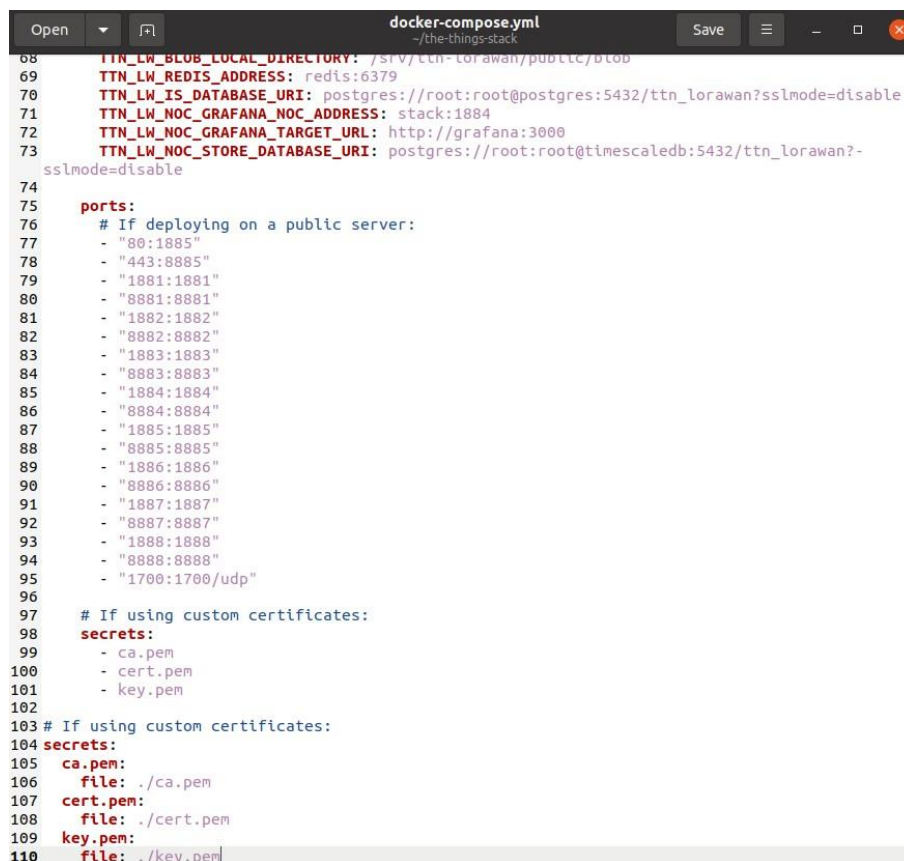
Para la instalación del servidor local The Things Stack TTS, es necesario ingresar su dirección web, descargar algunos archivos y poseer una versión actualizada de docker-compose. Los archivos necesarios se encuentran en la página web <https://www.thethingsindustries.com/docs/getting-started/installation/>. Este procedimiento se realiza desde la terminal de Linux como se muestra en el Listado A.1.

```
1 sudo mkdir the-things-stack
2 sudo cd the-things-stack
3 sudo mkdir config/stack
4 sudo curl https://www.thethingsindustries.com/docs/getting-
   started/installation/configuration/docker-compose-open-
   source.yml > docker-compose.yml
5 sudo curl https://www.thethingsindustries.com/docs/getting-
   started/installation/configuration/ttn-lw-stack-docker-open-
   source.yml > config/stack/ttn-lw-stack-docker.yml
```

Extracto de código A.1: Instalación del servidor

Una vez descargados estos archivos, se agregan varias líneas de código en el script docker-compose.yml, especificando cada uno de los certificados (Figura A.1). Posteriormente, en el script ttn-lw-stack-docker.yml se coloca la dirección local del ordenador en donde se realizan las configuraciones (Figura A.2).

El siguiente paso consta de la creación y entrega de los permisos adecuados a cada uno de los certificados, para que de esta manera el servidor funcione sin problema. Los pasos a seguir se encuentran en la página: <https://www.thethingsindustries.com/docs/getting-started/installation/certificates/>. En el único certificado donde se debe especificar la dirección local es cert.json. En el Listado A.2, se muestra la creación de los certificados mediante consola.



```

68 TTN_LW_NOX_LOCAL_DIRECTORY: /srv/tn-lorawan/publcc/blow
69 TTN_LW_NOX_REDIS_ADDRESS: redis:6379
70 TTN_LW_NOX_IS_DATABASE_URI: postgres://root:root@postgres:5432/ttn_loxawan?sslmode=disable
71 TTN_LW_NOX_GRAFANA_NOX_ADDRESS: stack:1884
72 TTN_LW_NOX_GRAFANA_TARGET_URL: http://grafana:3000
73 TTN_LW_NOX_STORE_DATABASE_URI: postgres://root:root@timescaledb:5432/ttn_loxawan?-
sslmode=disable
74
75 ports:
76   # If deploying on a public server:
77   - "80:1885"
78   - "443:8885"
79   - "1881:1881"
80   - "8881:8881"
81   - "1882:1882"
82   - "8882:8882"
83   - "1883:1883"
84   - "8883:8883"
85   - "1884:1884"
86   - "8884:8884"
87   - "1885:1885"
88   - "8885:8885"
89   - "1886:1886"
90   - "8886:8886"
91   - "1887:1887"
92   - "8887:8887"
93   - "1888:1888"
94   - "8888:8888"
95   - "1700:1700/udp"
96
97   # If using custom certificates:
98   secrets:
99     - ca.pem
100    - cert.pem
101    - key.pem
102
103 # If using custom certificates:
104 secrets:
105   ca.pem:
106     file: ./ca.pem
107   cert.pem:
108     file: ./cert.pem
109   key.pem:
110     file: ./key.pem

```

Figura A.1: Modificación del archivo de configuración docker-compose.yml

```

1 cfssl genkey -initca ca.json | cfssljson -bare ca
2 cfssl gencert -ca ca.pem -ca-key ca-key.pem cert.json |
  cfssljson -bare cert
mv cert-key.pem key.pem
3

```

Extracto de código A.2: Creación de certificados

A.1.2. Configuración del servidor

Los últimos pasos para poner en funcionamiento el servidor The Things Stack TTS son los mostrados en la Listado A.3.

```

1 sudo docker-compose pull
2 sudo docker-compose run --rm stack is-db create-tenant
3 sudo docker-compose run --rm stack is-db create-admin-user \
  --id admin \
4
5   --email your@email.com

```

```

49 pprof:
50   password: "pprof" # choose a password
51
52 # If using custom certificates:
53 tls:
54   source: file
55   root-ca: /run/secrets/ca.pem
56   certificate: /run/secrets/cert.pem
57   key: /run/secrets/key.pem
58
59 # Let's encrypt for "192.168.18.88"
60 #tls:
61 #   source: "acme"
62 #   acme:
63 #     dir: "/var/lib/acme"
64 #     email: "jor@192.168.18.88"
65 #     hosts: ["192.168.18.88"]
66 #     default-host: "example"
67
68 # If Gateway Server enabled, defaults for "192.168.18.88":
69 gs:
70   mqtt:
71     public-address: "192.168.18.88:1882"
72     public-tls-address: "192.168.18.88:8882"
73   mqtt-v2:
74     public-address: "192.168.18.88:1881"
75     public-tls-address: "192.168.18.88:8881"
76
77 # If Gateway Configuration Server enabled, defaults for "192.168.18.88":
78 gcs:
79   basic-station:
80     default:
81       lns-uri: "wss://192.168.18.88:8887"
82   the-things-gateway:
83     default:
84       mqtt-server: "mqtts://192.168.18.88:8881"
85
86 # Web UI configuration for "192.168.18.88":
87 console:
88   ui:
89     canonical-url: "https://192.168.18.88/console"
90     is:
91     base-url: "https://192.168.18.88/api/v3"

```

Figura A.2: Modificación del archivo de configuración ttn-lw-stack-docker.yml

```

6 sudo docker-compose run --rm stack is-db create-oauth-client \
7   --id cli \
8   --name "Command Line Interface" \
9   --owner admin \
10  --no-secret \
11  --redirect-uri "localhost" \
12  --redirect-uri "code"
13 sudo docker-compose run --rm stack is-db create-oauth-client \
14  --id ${ID} \
15  --name "${NAME}" \
16  --owner admin \
17  --secret "${CLIENT_SECRET}" \
18  --redirect-uri "${REDIRECT_URI}" \
19  --redirect-uri "${REDIRECT_PATH}" \
20  --logout-redirect-uri "${LOGOUT_REDIRECT_URI}" \

```

```
21 --logout-redirect-uri "${LOGOUT_REDIRECT_PATH}"
```

Extracto de código A.3: Configuración del Servidor

Para este proceso, se debe tener presente la dirección IP de la computadora en donde se realizan las configuraciones.

De esta manera, se completa la instalación. En la figura A.3 se muestra el servidor en funcionamiento. El comando que se utiliza para poder ponerlo en marcha es el siguiente:

```
$sudo docker-compose up
```

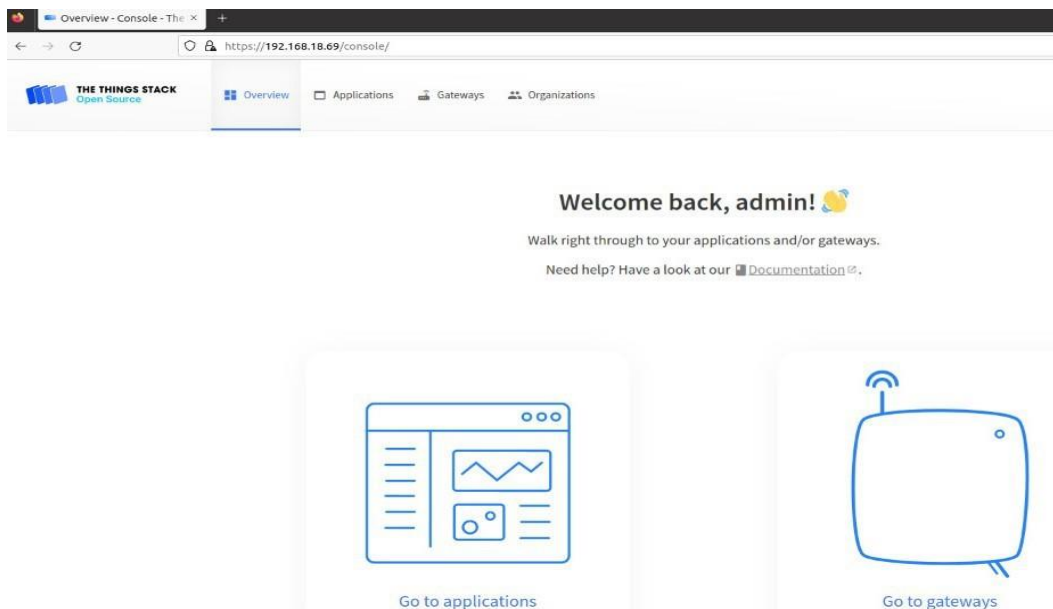


Figura A.3: Página de Bienvenida del Servidor The Things Stack

A.2. Creación y configuración del gateway

Para la creación del Gateway, es necesario ingresar a las opciones: Gateway - Register Gateway, como se observa en la figura A.4.

Para la creación del Gateway, es necesario especificar los siguientes parámetros (Figura A.5).

- **Gateway EUI:** Dirección Media Access Control (MAC) del dispositivo LoPy4.

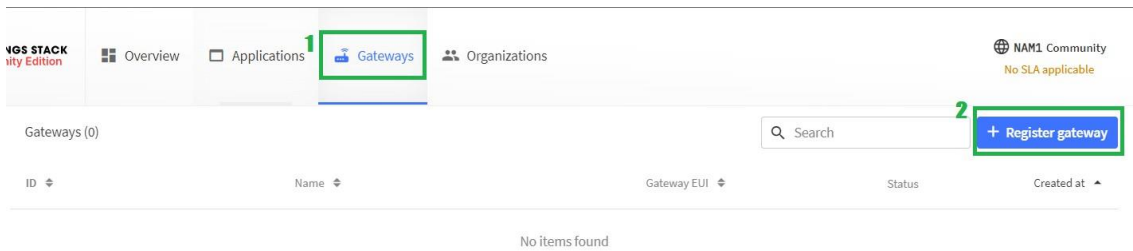


Figura A.4: Creación del Gateway en el Servidor The Things Network.

- **Gateway ID:** Nombre de identificación del Gateway, este nombre se genera automáticamente o puede ser cambiado.
- **Gateway Name:** Nombre del Gateway.
- **Frequency Plan:** Frecuencia de trabajo a la que funcionara todos los dispositivos (United States 902-928 Mhz).

Register gateway

Register your gateway to enable data traffic between nearby end devices and the network. Learn more in our guide on [Adding Gateways](#).

Gateway EUI

CC 50 E3 FF FE 9C 73 C4

Gateway ID *

eui-cc50e3ffe9c73c4

Gateway name

Gateway-Prueba

Frequency plan *

United States 902-928 MHz, FSB 2 (used by TTN) | v

Require authenticated connection

Choose this option eg. if your gateway is powered by [LoRa Basic Station](#)

Share gateway information

Select which information can be seen by other network participants, including [Packet Broker](#)

Share status within network

Share location within network

Figura A.5: Configuración del gateway.

A.3. Configuración de la aplicación y de los nodos en el servidor TTN

A.3.1. Configuración de aplicación

Para crear la aplicación es necesario entrar en las opciones: Applications - Create Applications, como se observa en la Figura A.6.

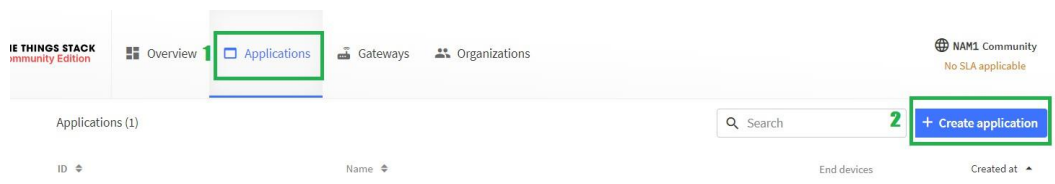


Figura A.6: Creación de la aplicación en TTN.

Continuando con el procedimiento, en la Figura A.7 se muestra la creación de la aplicación, en donde se coloca el nombre e identificación. Por ultimo, si desea se puede colocar una descripción.

Create application

Within applications, you can register and manage end devices and their network data. After setting up your device fleet, use one of our many integration options to pass relevant data to your external services.

Learn more in our guide on [Adding Applications](#).

Application ID *

Application name

Description

Optional application description; can also be used to save notes about the application

Figura A.7: Configuración de la aplicación en TTN.

A.3.2. Configuración de los nodos en el servidor TTN

Para crear los nodos, es necesario entrar en la aplicación creada en el punto anterior. Aquí se debe seleccionar la pestaña Register end device, tal como se observa en la Figura A.8.

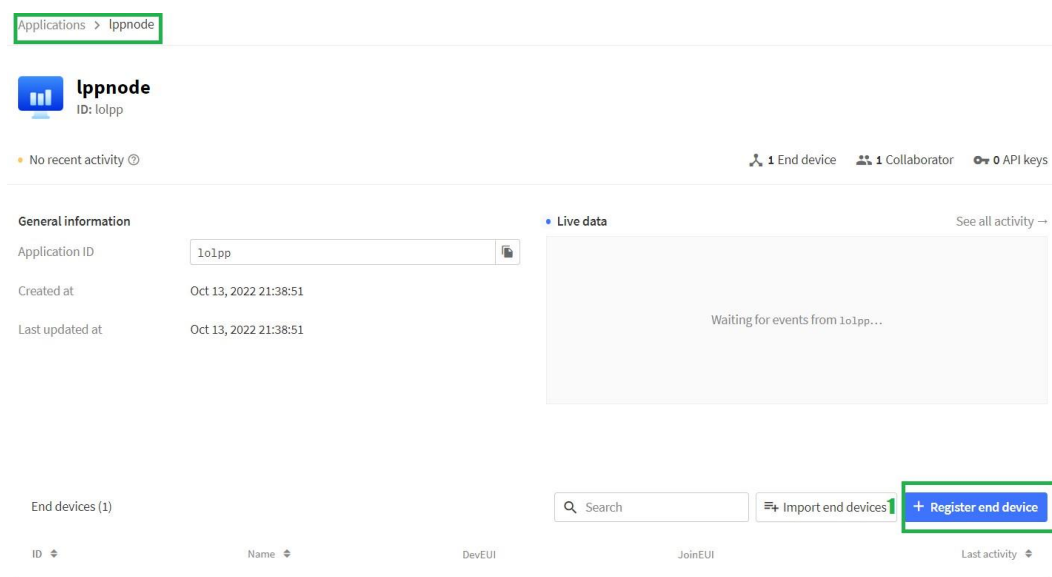


Figura A.8: Creación de Dispositivos finales en el servidor TTN

Para el registro de un nuevo dispositivo (nodos) es necesario realizar las siguientes configuraciones, las mismas se presentan en la figura A.9 y A.10.

- **Input Method:** Indica el método de creación del dispositivo. En este caso es el método manual, ya que el dispositivo LoPy4 no se encuentra en el repositorio de LoRaWAN.
- **Frecuency plan:** Indica la frecuencia de trabajo a la que funcionan todos los dispositivos (United States 902-928 Mhz).
- **LoRaWAN version:** La versión que utilizan los dispositivos LoPy4 es la 1.0.2.
- **Regional Parameters version:** La versión esta directamente relacionada con la versión de LoRaWAN que se indica en el punto anterior.
- **Activation mode:** El modo de activación puede ser entre OTAA, ABP o Multicast. En este caso se utiliza el modo ABP.

Finalmente, se deben ingresar los siguientes parámetros:

- **DevEUI:** Se debe utilizar la MAC del nodo.
- **Device Address:** Este valor se genera automáticamente para el modo de autenticación ABP.
- **AppSKey:** Valor que se ajusta para encriptar y desencriptar la carga útil enviada

End device type

Input Method ⓘ

Select the end device in the LoRaWAN Device Repository

Enter end device specifics manually

Frequency plan ⓘ *

United States 902-928 MHz, FSB 2 (used by TTN) | ▾

LoRaWAN version ⓘ *

LoRaWAN Specification 1.0.2 | ▾

Regional Parameters version ⓘ *

RP001 Regional Parameters 1.0.2 | ▾

[Show advanced activation, LoRaWAN class and cluster settings](#) ^

Activation mode ⓘ

Over the air activation (OTAA)

Activation by personalization (ABP)

Define multicast group (ABP & Multicast)

Additional LoRaWAN class capabilities ⓘ

None (class A only) | ▾

Network defaults ⓘ

Use network's default MAC settings

Cluster settings ⓘ

Skip registration on Join Server

Figura A.9: Configuración de los nodos finales en el servidor TTN parte 1.

por el dispositivo.

- **NwkSKey:** Este valor es necesario para validar la integridad de cada mensaje, este intercambio se realiza entre el nodo y el servidor.
- **End device ID:** Es necesario para poder identificar y registrar el dispositivo final.

Provisioning information

DevEUI ⓘ

70 B3 D5 7E D0 05 93 EE 2/50 used

Device address ⓘ *

26 0C 35 EE

AppSKey ⓘ *

37 6B 9C 4C B4 8B 7B 85 51 E8 B1 96 FE 72 45 F2

NwkSKey ⓘ *

91 D0 85 CF 91 F5 F4 1F F4 1B 3F 48 00 21 3E 28

End device ID ⓘ *

eui-70b3d57ed00593ee

This value is automatically prefilled using the DevEUI

After registration

View registered end device

Register another end device of this type

Figura A.10: Configuración de los nodos finales en el servidor TTN parte 2.

Anexo B: Desarrollo de la aplicación en el servidor

En el presente apéndice, se realiza la descripción completa de la aplicación para decodificar las variables meteorológicas. Además, se presentan los elementos necesarios para decodificar y visualizar la carga útil enviada al servidor.

B.1. Descripción de la aplicación

La aplicación tiene como propósito decodificar las variables enviadas cada cierto tiempo, estas en forma de cadena y presentarlas por cada nodo en el servidor. Esto se puede observar en la Figura B.1.

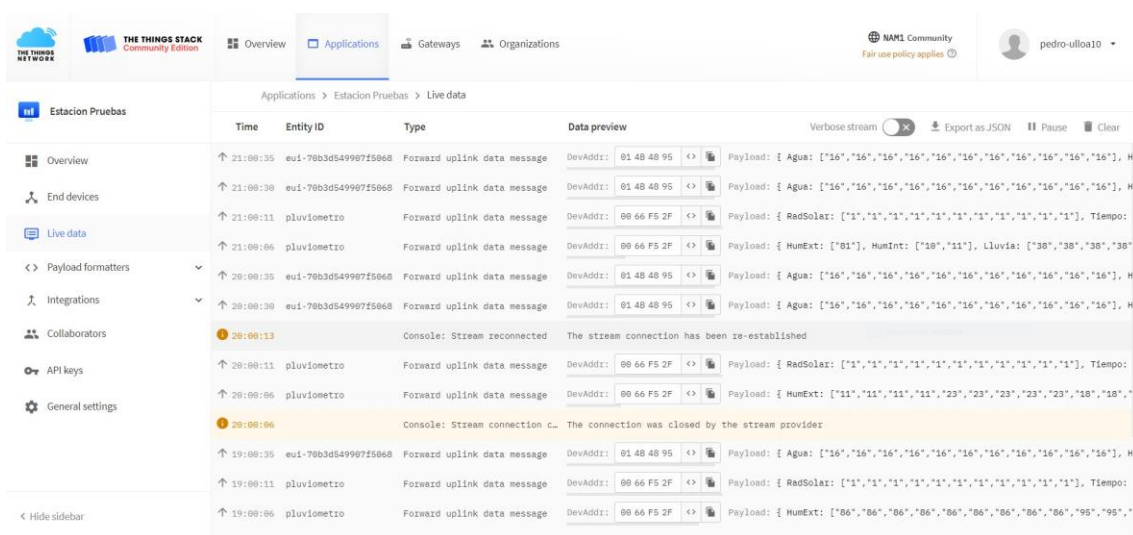


Figura B.1: Ventana de la aplicación del servidor The-Thing-Stack.

B.2. Decodificación de la carga útil de las variables meteorológicas

Para la decodificación de la carga útil, se crea una función por cada nodo, las cuales fueron realizadas en el lenguaje de programación Javascript. Estas funciones son similares entre si, salvo por el numero de sensores y tamaño de la trama.

B.2.1. Función para decodificar las variable meteorológicas del nodo nivel de agua

Esta función es la encargada de decodificar las variables meteorológicas del nodo Nivel de Agua. Contiene el tiempo de envió conjuntamente con los valores de los cuatro sensores (Nivel de Agua, Temperatura, Humedad, Nivel de Voltaje). En el siguiente diagrama de flujo B.2 se presenta el esquema de decodificación.

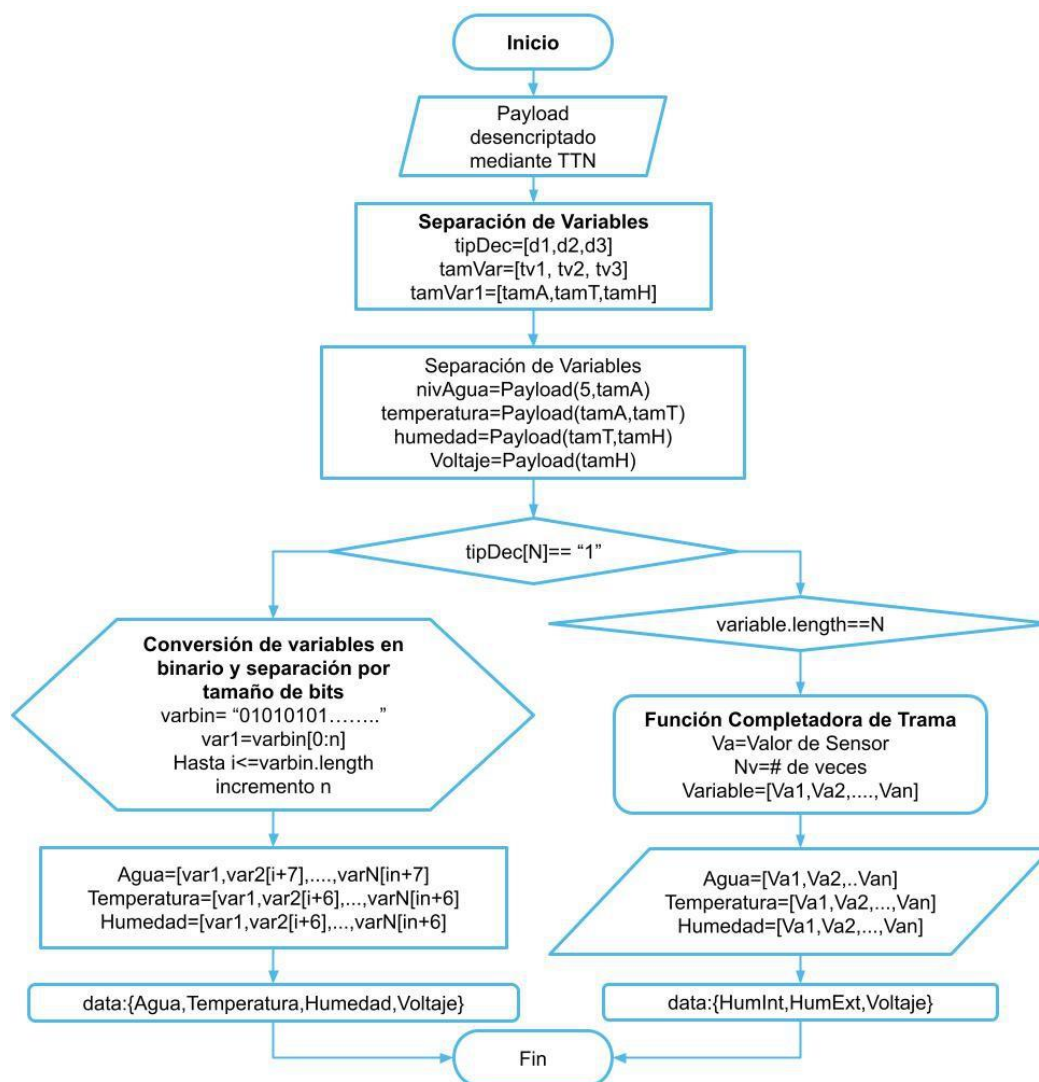


Figura B.2: Diagrama de Flujo: Decodificación de Variables Meteorológicas de nodo Nivel de Agua.

B.2.2. Función para decodificar las variables meteorológicas del nodo multiparamétrico

Esta función se encarga de decodificar las variables meteorológicas del nodo Pluviómetro. La carga útil esta separada en 3 mensajes, que contienen los doce valores de cada uno de los sensores. En el siguiente diagrama de flujo B.3 se presenta el esquema de decodificación.

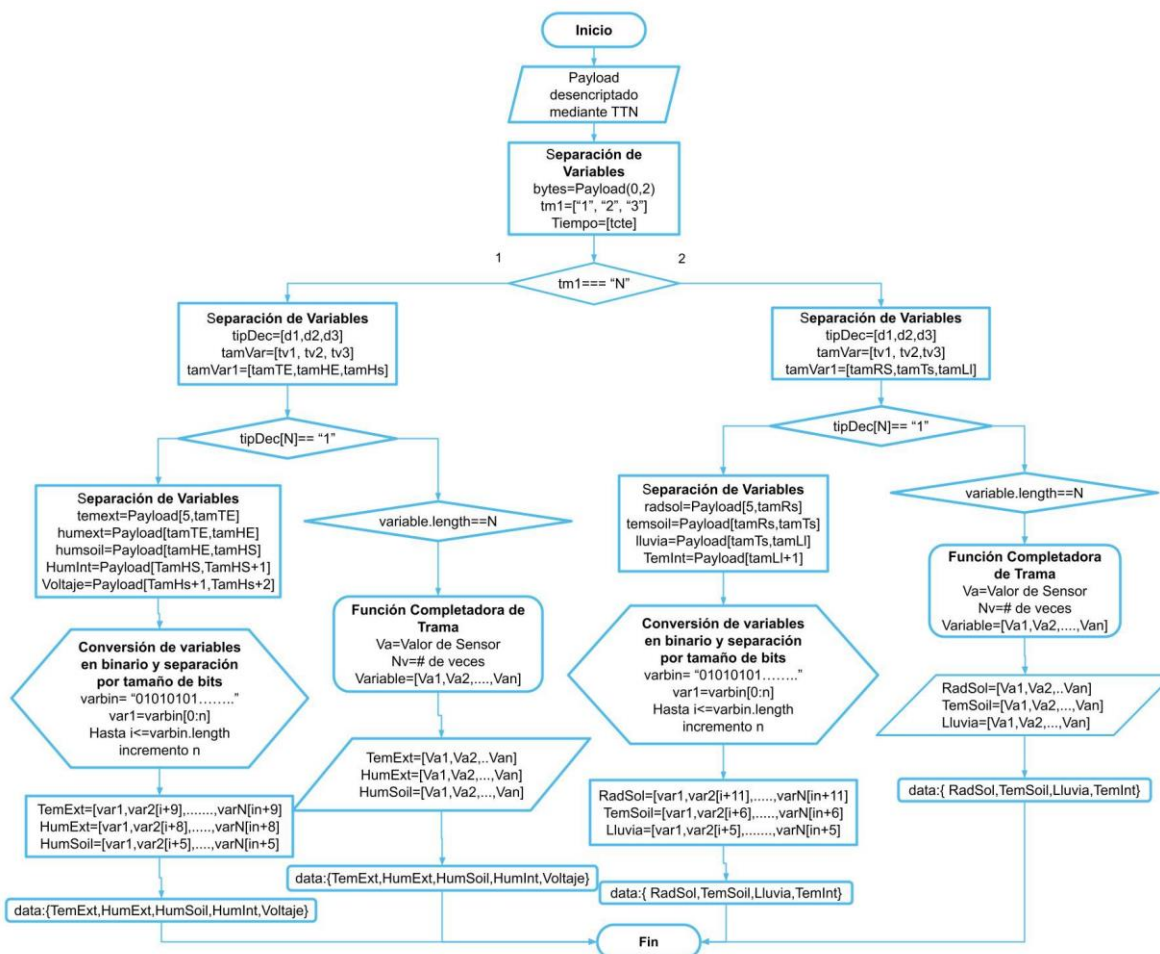


Figura B.3: Diagrama de Flujo: Decodificación de Variables Meteorológicas de nodo Pluviómetro.

Anexo C: Configuración de la aplicación Thingsboard

En el presente apéndice se presenta las configuraciones para visualizar las variables meteorológicas en el servidor Thingsboard.

C.1. Configuraciones previas para enlazar servidor TTN con Thingsboard

Las configuraciones están realizadas en el servidor Thingsboard en la versión demo. Al ingresar a la pagina: demo.thingsboard.io se puede encontrar este servidor para su descarga. El primer paso es crear un dispositivo, para esto se ingresan a las opciones: Dispositivos - Agregar Dispositivo - Seleccionar Gateway. Este procedimiento se puede observar en la Figura C.1.

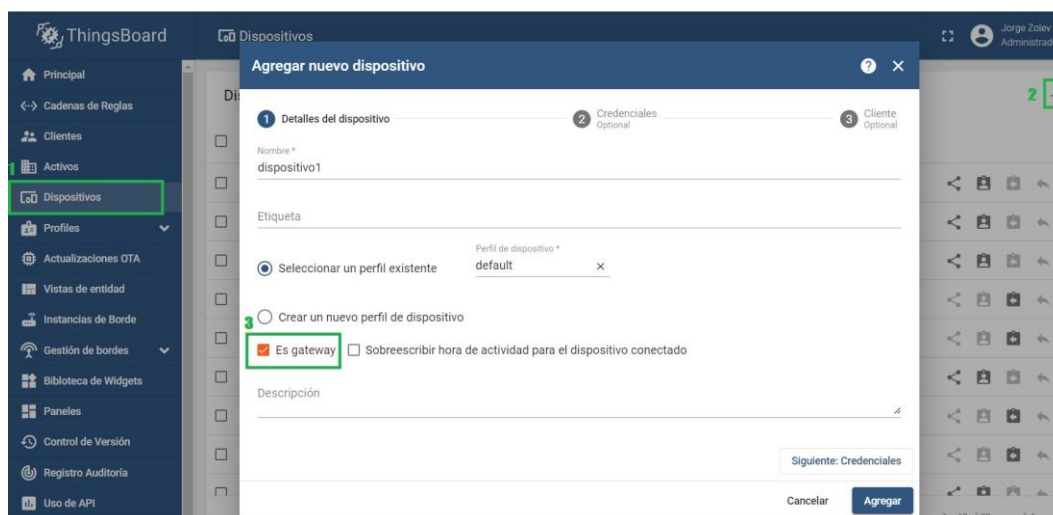


Figura C.1: Creación de Dispositivo en Thingsboard.

El siguiente punto a elaborar es la creación de un enlace que reenvíe todos los paquetes Uplink hacia el ThingsBoard. Con esta finalidad, se debe ingresar a: Applications - Integrations - Webhooks - Add Webhook - Custom Webhook. Este proceso se puede observar en la Figura C.2.

Es necesario copiar el Access Token del dispositivo en Thingsboard y luego reemplazarlo en la URL del Webhook (Figura C.3). Los parámetros enviados son los mensajes Uplink que llegan a la aplicación.

Para comprobar que la conexión funciona correctamente, se debe ingresar a cualquier dispositivo y simular un mensaje. Para ello, dentro del dispositivo final se debe

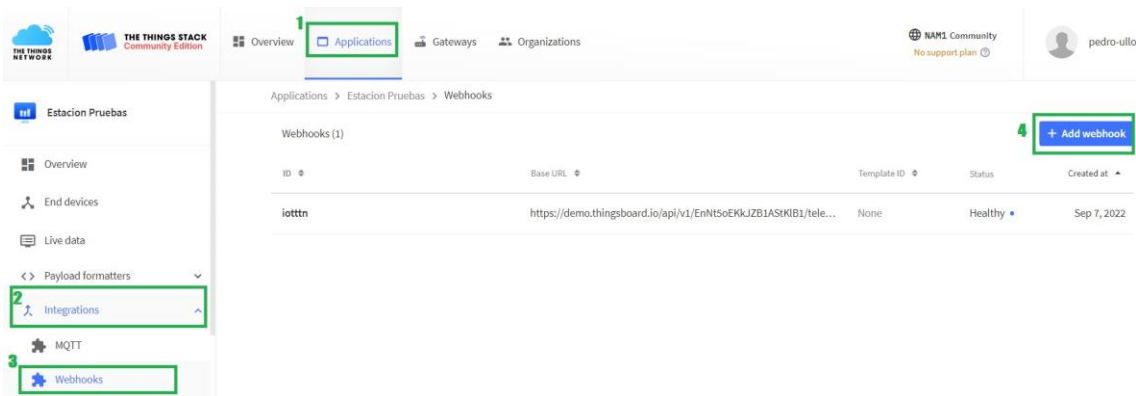


Figura C.2: Creación de enlace Webhook desde TTN.

Add webhook

The Webhooks feature allows The Things Stack to send application related messages to specific HTTP(S) endpoints. You can also use webhooks to schedule downlinks to an end device. Learn more in our [Webhooks guide](#).

General settings

Webhook ID *

Webhook format *

Base URL *

Downlink API key

The API key will be provided to the endpoint using the "X-Downlink-Apikkey" header

Request authentication

Use basic access authentication (basic auth)

Additional headers

+ Add header entry

Filter event data

+ Add filter path

Enabled event types

For each enabled event type an optional path can be defined which will be appended to the base URL

Uplink message

An uplink message is received by the application

Normalized uplink

A normalized uplink payload

Join accept

An end device successfully joins the network and starts a session

Figura C.3: Modificación de Webhook para el enlace de comunicación entre TTN y ThingsBoard.

seleccionar la pestaña de Messaging y colocar cualquier payload, ver Figura C.4. El mensaje simulado se puede observar en "Dispositivos", en la bandeja de última actividad, como se muestra en la Figura C.5

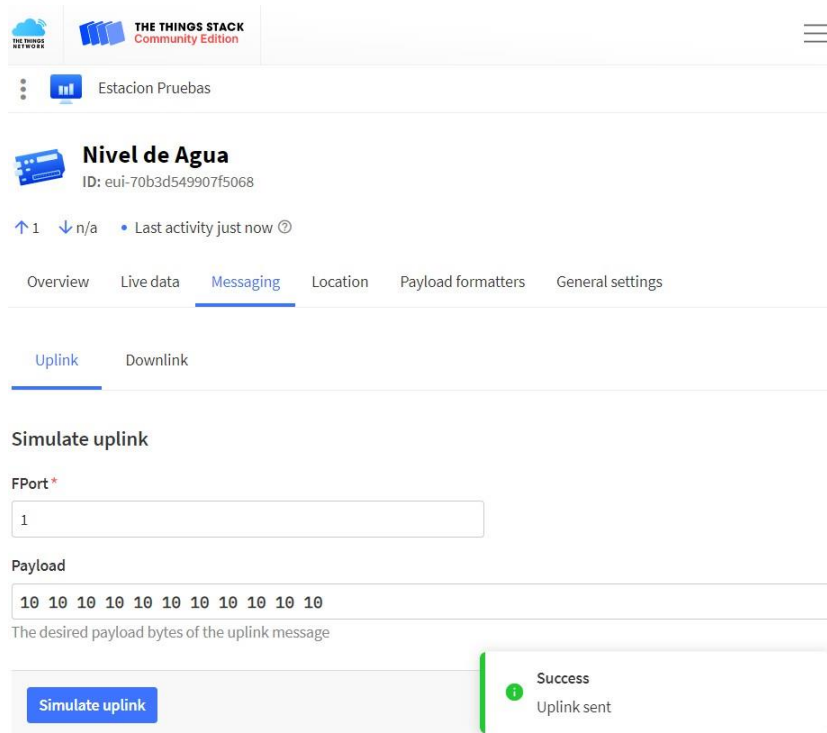


Figura C.4: Simulación de conexión de enlace desde TTN.

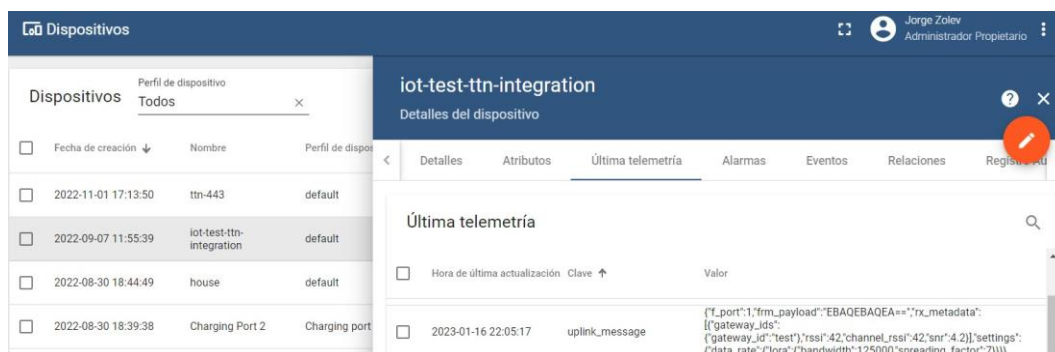


Figura C.5: Revisión de llegada de mensaje Simulado en ThingsBoard.

C.2. Cadena de reglas para la visualización de las variables meteorológicas

Por ultimo, para observar las distintas variables meteorológicas, es necesario modificar la cadena de reglas del Thingsboard con la finalidad de separar la cadena array de cada nodo, en sus respectiva variable y tiempo de captura. En el diagrama de flujo C.6 se presentan las cadena de reglas.

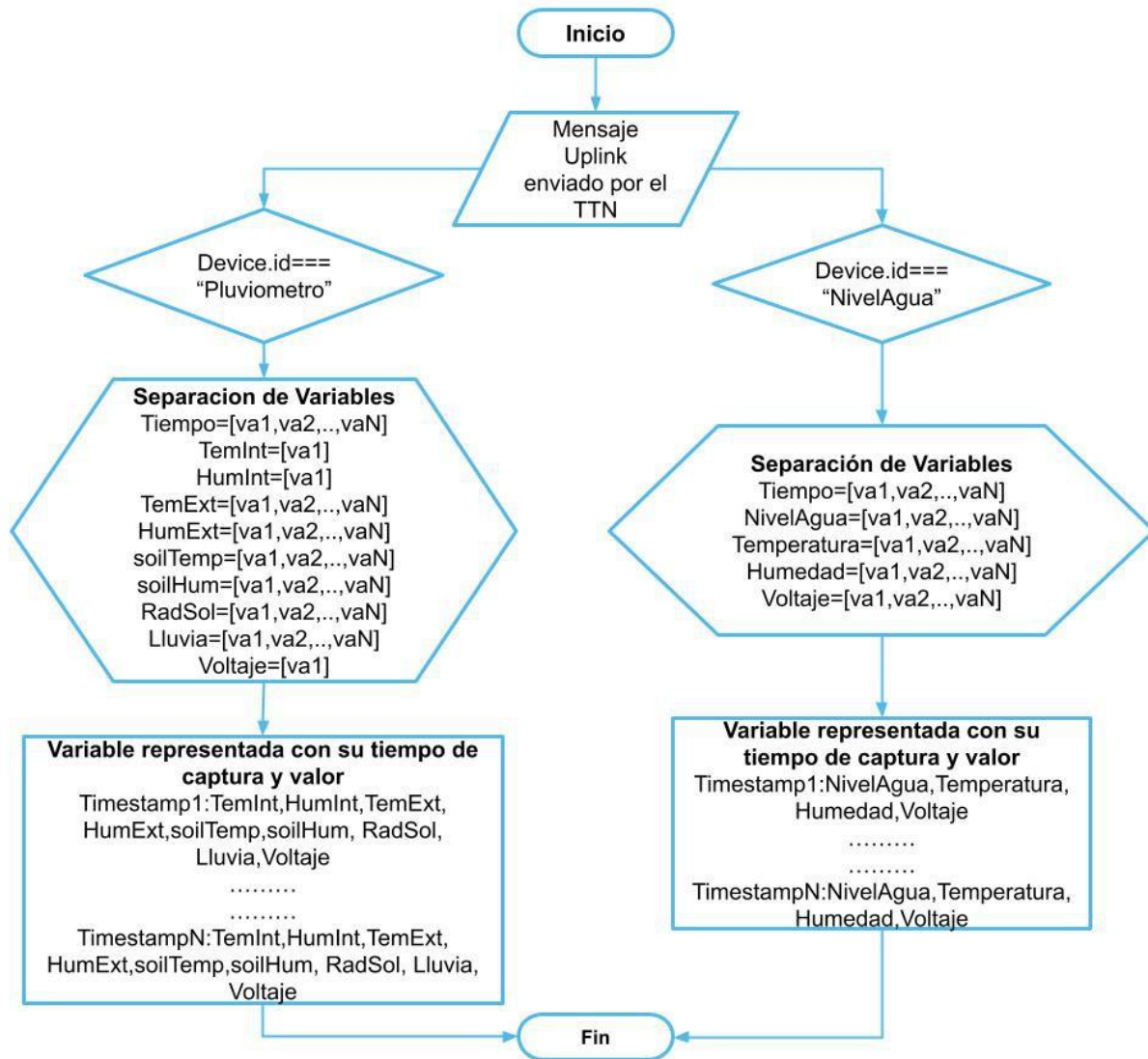


Figura C.6: Cadena de Reglas de ThingsBoard para observar las variables meteorológicas.

Anexo D: Características del hardware

D.1. Módulo LoPy4

Características de LoPy4 :

- Potente Central Processing Unit (CPU), BLE y WiFi de última generación.
- Se puede duplicar como un nano gateway LoRa.
- MicroPython habilitado.
- Cabe en una placa de prueba estándar (con headers).
- Sensibilidad de -126dBm en referencia al índice RSSI.
- Consumo de energía ultrabajo: Una fracción, en comparación con otros microcontroladores conectados.

Procesamiento :

- Conjunto de chips ESP32.
- Sistema de radio WiFi de doble procesador en chip.
- El procesador de red maneja la conectividad WiFi y la pila Internet Protocol Version 6 (IPv6).
- El procesador principal es totalmente gratuito para ejecutar la aplicación del usuario.
- Un co-procesador Ultra Low Power (ULP) adicional que puede monitorear los GPIO, los canales Analog to Digital Converter (ADC) y controlar la mayoría de los periféricos internos durante el modo de suspensión profunda mientras solo consume 25uA.

Especificación LoRa :

- Transceptor Semtech LoRa SX1276.
- Pila LoRaWAN.
- Dispositivos de clase A y C.

Frecuencias de funcionamiento de LoRa :

- 868 MHz (Europa) a máximo 14dBm.
- 915 MHz (América del Norte y del Sur, Australia y Nueva Zelanda) a un máximo de 20 dBm.
- 433 MHz (Europa) a máximo 10dBm.
- 470–510 MHz (China) a máximo 14dBm.

Especificación del rango de LoRa :

- Rango de los nodos: hasta 40 km.
- Nano gateway: hasta 22 km.
- Capacidad del Nano gateway: Hasta 100 nodos.

Interfaces :

- Canales analógicos: ADC de 8-12 bits.
- Temporizadores: 4-16 bits con Pulse Width Modulation (PWM) y captura de entrada.
- Direct Memory Access (DMA) en todos los periféricos.
- GPIO: Hasta 24.

Seguridad y certificaciones :

- Compatibilidad con Secure Sockets Layer (SSL)/Transport Layer Security (TLS).
- Seguridad empresarial Wi-Fi Protected Access (WPA).

Memoria :

- Random Access Memory (RAM): 4MB.
- Flash externo: 8 MB.
- Aceleración de coma flotante por hardware.
- Python multihilo.

Energía :

- Entrada: 3.3V - 5.5V.
- Salida: 3v3 capaz de generar hasta 400 mA.
- WiFi: 12mA en modo activo, 5uA en standby.
- LoRa: 15mA en modo activo, 1uA en standby.
- Sigfox (Europa): 12mA en modo recepción, 42mA en modo transmisión y 0.5uA en standby.
- Sigfox (Australia, Nueva Zelanda y América del Sur): 12mA en modo recepción, 120mA en modo transmisión y 0.5uA en standby.

Anexo E: Perfiles topográficos de las pruebas de transmisión

E.1. Transmisión a una distancia de 200m

La primera prueba de transmisión se realizó a una distancia de 200m, como se puede observar en la Figura E.1. La medición de RSSI alcanzó un valor de -70 .



Figura E.1: Prueba de trasmisión a 200m.

E.2. Transmisión a una distancia de 500m

La segunda prueba consta de una separación entre nodos y Gateway de 500m, tal y como se puede observar en la Figura E.2. El resultado del RSSI al enviar paquetes a esta distancia es de -85 .

E.3. Transmisión a una distancia de 1000m

En este caso se opta por una distancia entre dispositivos de mil metros o un kilómetro, Figura E.3. El RSSI observado fue de alrededor de -86 .

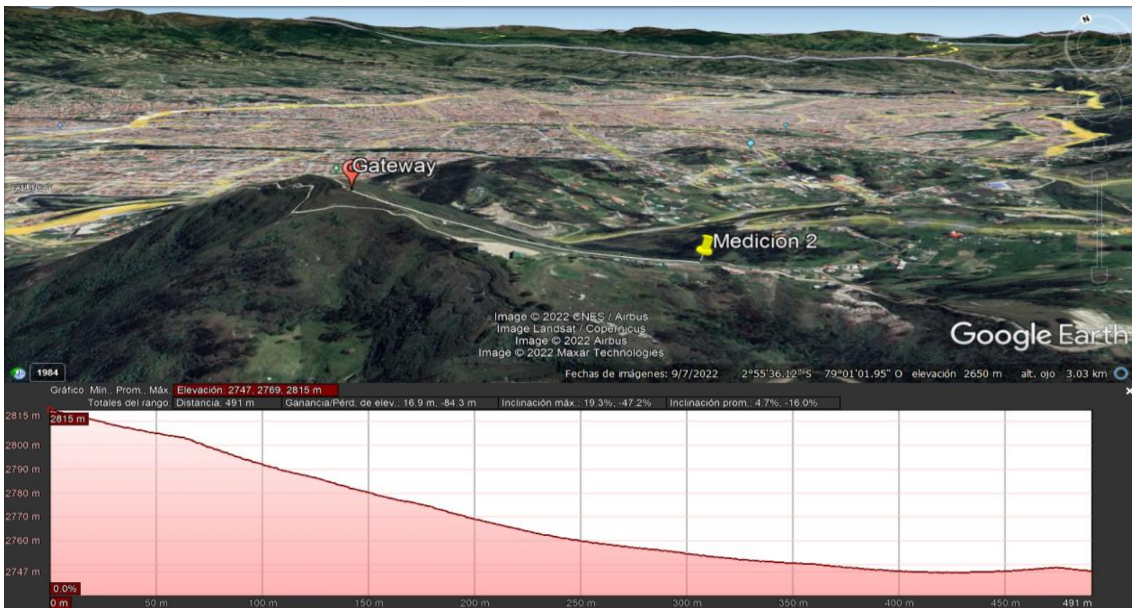


Figura E.2: Prueba de trasmisión a 500m.

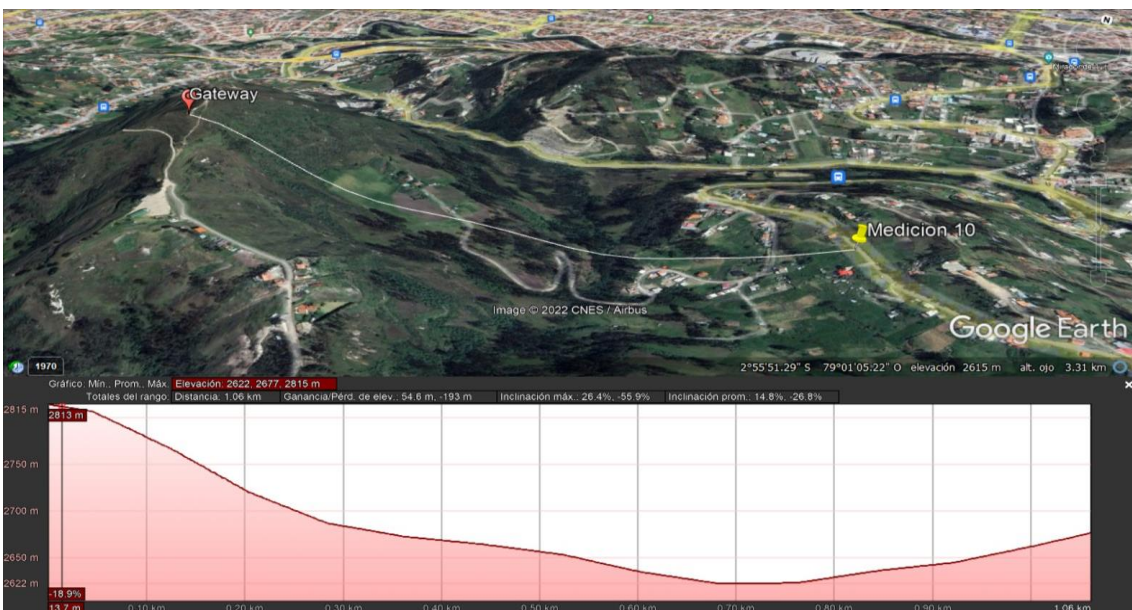


Figura E.3: Prueba de trasmisión a 1000m.

E.4. Transmisión a una distancia de 1400m

Con el fin de conocer hasta que distancia se obtiene un valor de RSSI adecuado para la implementación de la red, se toma como referencia una separación de 1400m (Figura E.4). El indicador RSSI corresponde a un valor de -96 .

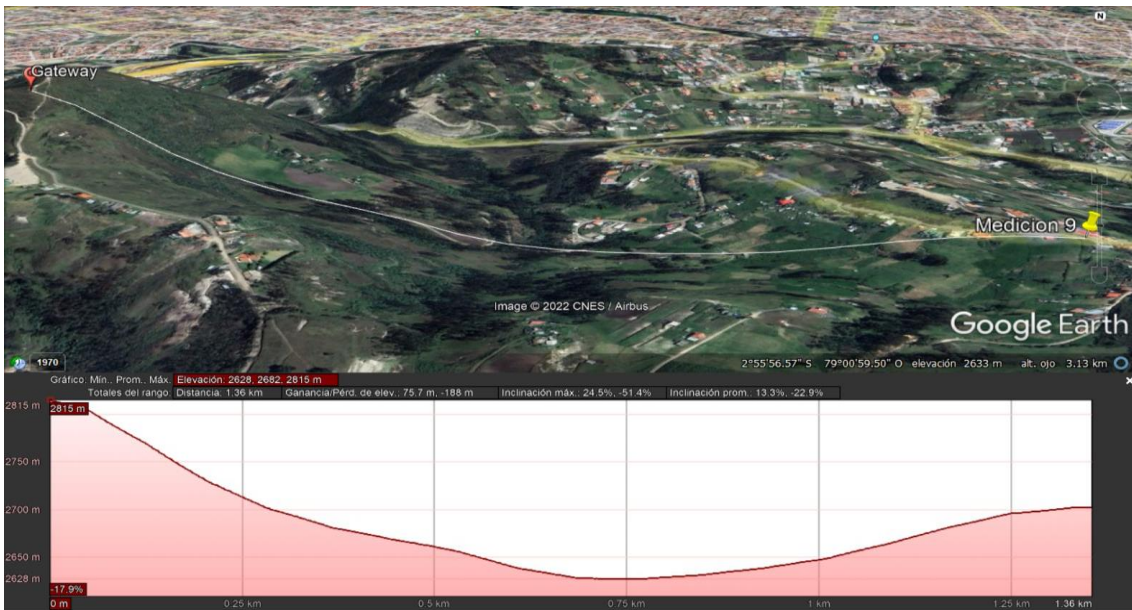


Figura E.4: Prueba de trasmisión a 1400m.

E.5. Transmisión a una distancia de 2000m

Siguiendo con el procedimiento antes mencionado, se realiza la prueba de transmisión a una separación de 2000m, ver Figura E.5. El RSSI medido es cercano a un valor de -102 .

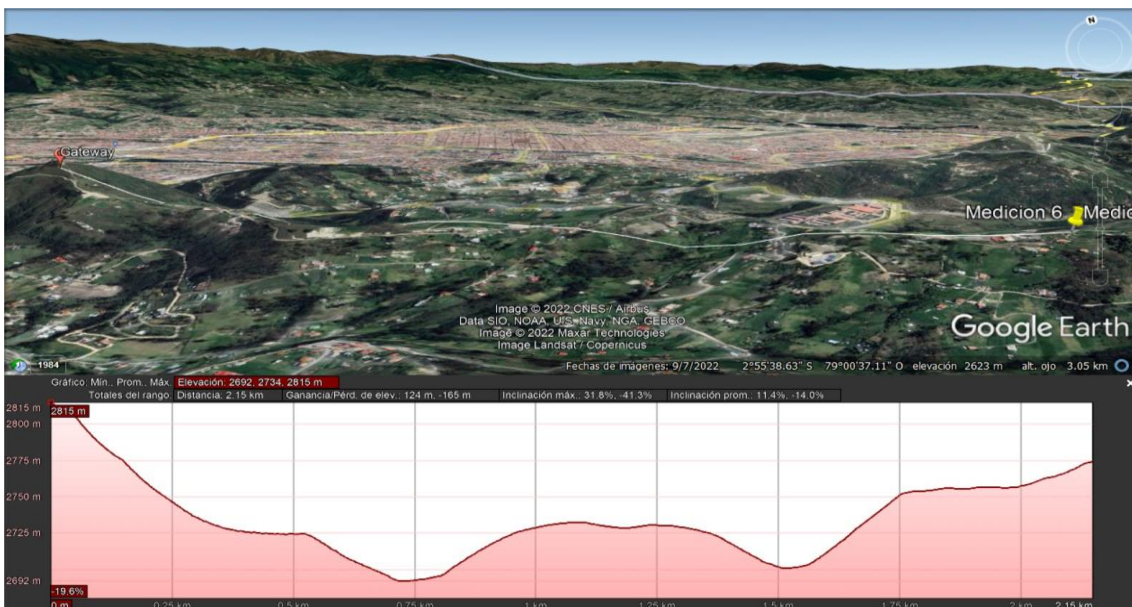


Figura E.5: Prueba de trasmisión a 2000m.

E.6. Transmisión a una distancia de 2500m

De igual manera que en los casos anteriores, se realiza la transmisión a una separación de 2500m Figura E.6, con el fin de obtener un valor de RSSI que indique si la potencia de recepción es aceptable. El RSSI medido es cercano a -98 .

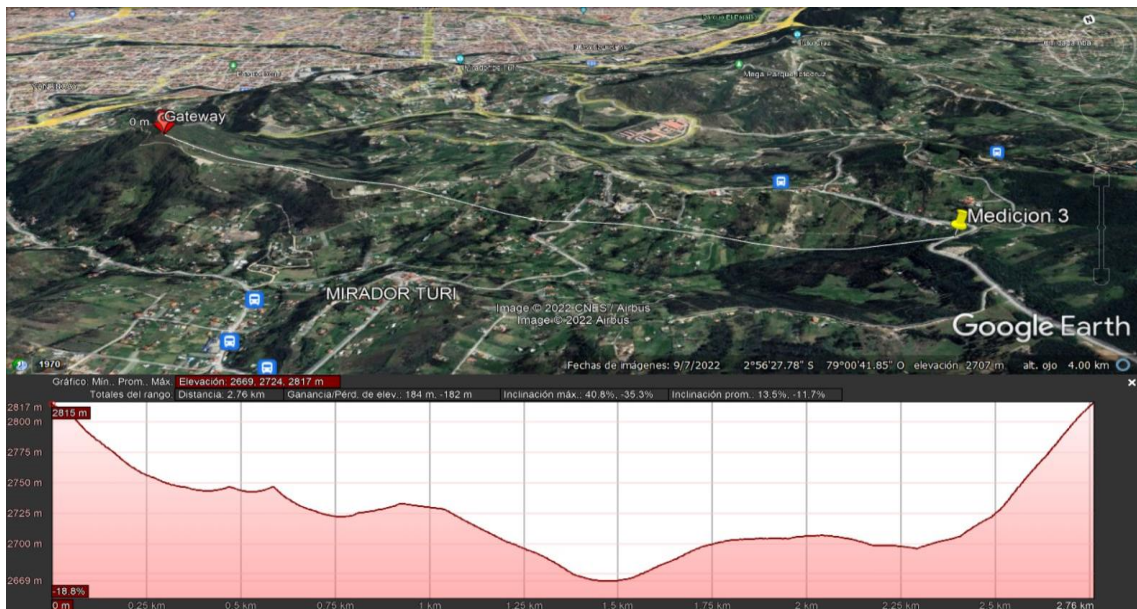


Figura E.6: Prueba de trasmisión a 2500m.

E.7. Transmisión a una distancia de 3000m

En las pruebas de transmisión con una separación de 3000m se obtuvo un valor de RSSI de -103 (ver Figura E.7).

E.8. Transmisión a una distancia de 3500m

Como prueba final, se utiliza una distancia entre los nodos y el Gateway de 3500m, tal como se muestra en la Figura E.8, A esta separación se tiene un valor de RSSI cercano a los -98 .

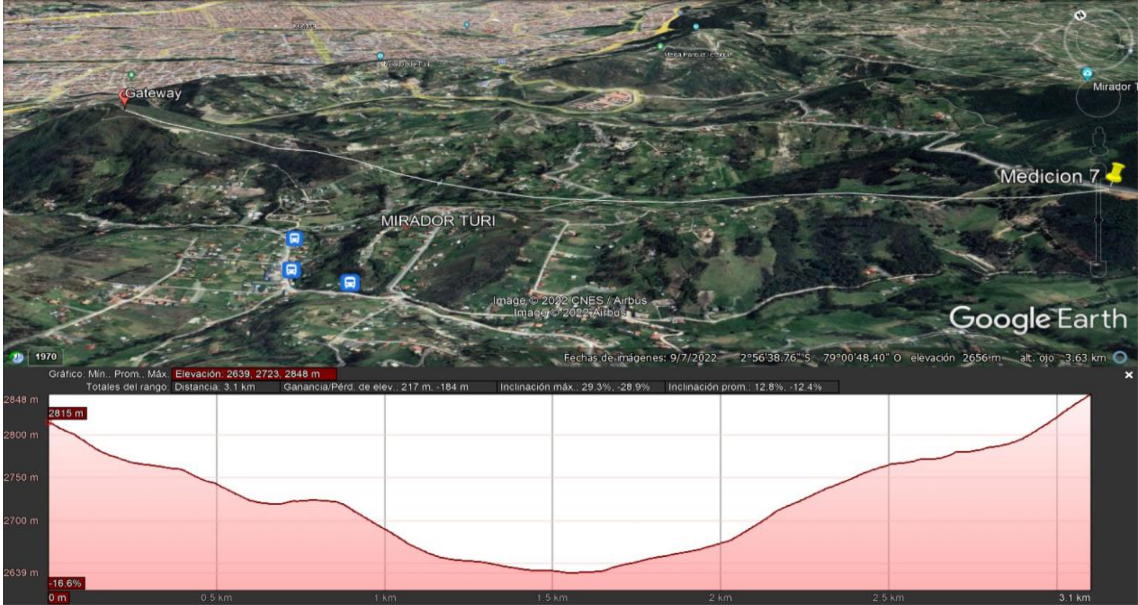


Figura E.7: Prueba de trasmisión a 3000m.

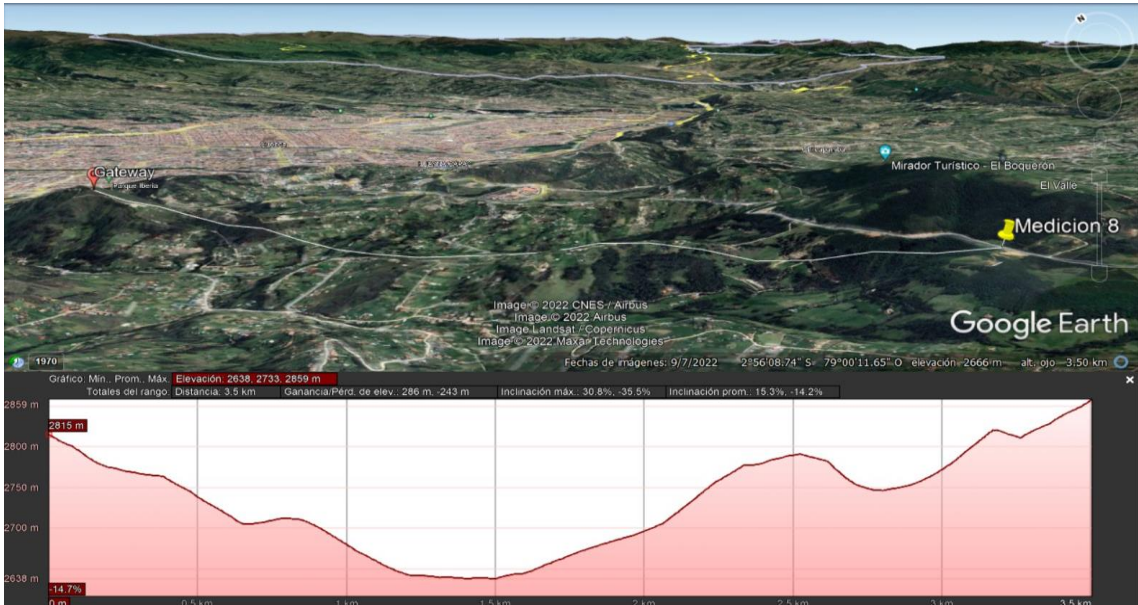


Figura E.8: Prueba de trasmisión a 3500m.