



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

**UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Sistema de Alerta temprana ante inundaciones bajo escenarios de cambio
climático para el río Tomebamba, Cuenca-Ecuador**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Autores:

ANDRÉS SANTIAGO SERRANO COELLO

DAVID ESTEBAN OCHOA LUZURIAGA

Director:

ING. DANIEL ESTEBAN ITURRALDE PIEDRA PhD.

CUENCA, ECUADOR

2024

DEDICATORIA

Dedico este trabajo primeramente a Dios por haberme dado la oportunidad de haber llegado a este momento en mi vida profesional. A mi madre y a mi padre por haber sido los pilares fundamentales en mi desarrollo educativo siendo el apoyo y la inspiración para perseguir mi objetivo.

David Esteban Ochoa Luzuriaga

AGRADECIMIENTOS

David Ochoa: “En primer lugar les agradezco a mis padres que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. Ellos son los que con su cariño me han impulsado siempre a perseguir mis metas y nunca abandonarlas frente a las adversidades. También son los que me han brindado el soporte material y económico para poder concentrarme en los estudios y nunca abandonarlos”.

“Agradezco también a mi tutor por su dedicación y paciencia, sin sus palabras y correcciones precisas no hubiese podido lograr llegar a esta instancia tan anhelada. Gracias por su guía y todos sus consejos, los llevaré grabados para siempre en la memoria en mi futuro profesional”.

“Finalmente son muchos los docentes que han sido parte de mi camino universitario, y a todos ellos les quiero agradecer por transmitirme los conocimientos necesarios para hoy poder estar aquí. Sin ustedes los conceptos serían solo palabras las cuales se llevaría el viento”.

SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA ANTE INUNDACIONES BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL RÍO TOMBAMBA, CUENCA-ECUADOR

Ante la influencia de las lluvias intensas que generan inundaciones por el desbordamiento de ríos en entornos fluviales, en este trabajo se implementó un sistema de transmisión de datos que tiene como fin alertar estas posibles inundaciones, este sistema es autónomo pues utiliza energía solar para su alimentación. Por medio de nodos constituidos por sensores ultrasónicos conectados a microcontroladores se obtienen datos de nivel de agua los cuales son transmitidos por tecnología LoRa hacia un Gateway que envía la información hacia una plataforma IoT local en un dispositivo Raspberry Pi 4 que permite la visualización de los datos de nivel en rangos de tiempo definidos en una interfaz gráfica amigable al usuario. Para la correcta implementación del sistema se realizaron pruebas de campo que corroboraron la precisión de los sensores y la influencia del entorno en la cobertura y alcance de la transmisión de datos.

Palabras clave: LoRa, Inundaciones, Sistema de alerta temprana, Arduino, Raspberry

EARLY WARNING SYSTEM FOR FLOODS IN CLIMATE CHANGE SCENARIOS FOR THE TOMBAMBA RIVER, CUENCA-ECUADOR.

Due to the influence of heavy rains, which generate floods as a result of the overflowing of rivers in fluvial environments, a data transmission system was implemented to alert of possible floods, this system is autonomous, because it uses solar energy for its power supply. Through the use of nodes consisting of ultrasonic sensors connected to microcontrollers, water level data were obtained and transmitted by LoRa technology to a Gateway, which sends the information to a local IoT platform in a Raspberry Pi 4 device. This allows the visualization of level data in defined time ranges in a user-friendly graphical interface. For the correct implementation of the system, field tests were performed to corroborate the accuracy of the sensors and the influence of the environment on the coverage and range of data transmission.

Keywords: LoRa, Flooding, Early warning system, Arduino, Raspberry

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Dedicatoria	i
Agradecimiento	ii
Resumen	iii
Abstract	iv
Índice de Figuras	vi
Índice de Tablas	vi
I Introducción	1
II DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	2
II-A Nodo Final	2
II-B Comunicación LoRa	4
II-C Conexión a Red	5
II-D Visualización IoT	5
III Resultados	6
IV Conclusiones	7
Referencias	8

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Número de Desastres por inundaciones en todo el mundo desde 1990 a 2022	1
2	Esquema gráfico del Sistema	3
3	Diagrama de bloques de la Sección A	3
4	Diagrama de bloques de la Sección B	4
5	Diagrama de bloques de la Sección C	5
6	Diagrama de Bloques de la Sección D	5
7	Comunicación serial	6
8	Precisión de sensores de nivel	6
9	Puntos de medición de potencia	7
10	Recepción de potencia	7
11	Datos recibidos en The Things Network	7
12	Menú principal de aplicación	7
13	Página de datos del nodo final	7

ÍNDICE DE TABLAS

I	Especificaciones del Microcontrolador Arduino MKR WAN 1310.	3
II	Especificaciones del Sensor	4
III	Especificaciones de la fuente de Alimentación	4
IV	Especificaciones de la Comunicación LoRa	4
V	Especificaciones del Dispositivo Gateway	5
VI	Interfaces del dispositivo Raspberry Pi	5
VII	Medición de la precisión de sensores a diferentes distancias.	6

Sistema de Alerta temprana ante inundaciones bajo escenarios de cambio climático para el río Tomebamba, Cuenca-Ecuador

Andrés Santiago Serrano Coello
Ingeniería Electrónica
Universidad del Azuay
Cuenca, Ecuador
address.c@es.uazuay.edu.ec

David Esteban Ochoa Luzuriaga
Ingeniería Electrónica
Universidad del Azuay
Cuenca, Ecuador
dochoal@es.uazuay.edu.ec

Abstract—Ante la influencia de las lluvias intensas que generan inundaciones por el desbordamiento de ríos en entornos fluviales, en este trabajo se implementó un sistema de transmisión de datos que tiene como fin alertar estas posibles inundaciones, este sistema es autónomo pues utiliza energía solar para su alimentación. Por medio de nodos constituidos por sensores ultrasónicos conectados a microcontroladores se obtienen datos de nivel de agua los cuales son transmitidos por tecnología LoRa hacia un Gateway que envía la información hacia una plataforma IoT local en un dispositivo Raspberry Pi 4 que permite la visualización de los datos de nivel en rangos de tiempo definidos en una interfaz gráfica amigable al usuario. Para la correcta implementación del sistema se realizaron pruebas de campo que corroboraron la precisión de los sensores y la influencia del entorno en la cobertura y alcance de la transmisión de datos.

Index Terms—LoRa, Sistema de alerta temprana, Inundaciones, Arduino, Raspberry.

I. INTRODUCCIÓN

Las épocas en las cuales se tienen lluvias intensas y prolongadas causan desbordamiento de ríos, acumulación de agua por precipitación constante, y azolvamiento de canales hidráulicos, las cuales, a su vez, provocan inundaciones, convirtiendo a este fenómeno natural en uno de los más constantes y riesgosos del mundo para el ser humano. De acuerdo a estadísticas, en 2022 existieron 176 desastres por inundación registrados en el mundo., y aunque frente a los 222 desastres registrados en 2021 [1] es una reducción significativa de casos, no se puede obviar el hecho de que al depender en su mayoría de causas naturales no puede existir una certeza de reducción de inundaciones en los años posteriores tal como se puede observar en la Fig 1 obtenida del sitio web Statista, que muestra el número de desastres registrados en el mundo desde 1990 hasta 2022, otro dato significativo es que América Latina y el Caribe constituyen la segunda región del mundo más afectada por inundaciones, y es que desde el año 2000 se registraron 681 inundaciones teniendo en este periodo de tiempo también 12 de las inundaciones más desastrosas pues causaron mas de 1000 millones de dólares en daños totales [2]. Nuestra región al ser una zona geográficamente fluvial ha sufrido de varias situaciones de riesgo principalmente por el

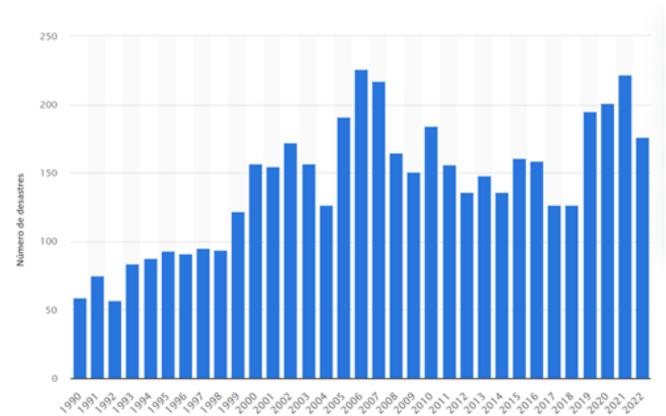


Fig. 1. Número de Desastres por inundaciones en todo el mundo desde 1990 a 2022

desborde en el caudal de los ríos causando inundaciones en Cuenca Octubre del 2022 [3] y en Abril del 2023 afectando a zonas como Ricaurte, Challuabamba y el Batán [4], y es que en Enero del 2023 se registró un promedio de menos de un milímetro de agua por lluvia al día, y en el mes siguiente un aumento en promedio de milímetro y medio más, esto supone un riesgo latente alertando a los moradores de los sectores aledaños a los ríos pues se tiene el antecedente del año 2020 en el cual el desborde de los ríos puso en riesgo la autonomía de la infraestructura de varios puentes [5].

El monitoreo de nivel de agua para prevención de inundaciones, es un tema ya empleado en estudios previos a nivel mundial, nacional y local. Las relaciones que se pueden encontrar con respecto a las características del proyecto que se quiere realizar son varias, una de ellas por ejemplo es el uso de sensores de nivel de agua para monitoreo y posterior prevención de desastres mediante el uso de redes de área amplia y baja potencia (LPWAN) inclinándose por la tecnología “LoRa” la cual generó ciertos problemas ante su bajo ancho de banda, pero grandes ventajas por su larga distancia de transmisión [6].

La relación encontrada con proyectos previos también deja ver el uso de microcontroladores como bases de datos locales previo al envío a una plataforma de monitoreo, esto con el fin de informar y prevenir inundaciones, así lo implementó la Universidad Islam Riau planteando un sistema para contaminación y monitoreo en ríos locales el cual arroja constantemente datos que aún no han podido prevenir inundaciones, pero serán útiles en un futuro para informar a la población ante el riesgo de las mismas [7].

El uso de sensores de nivel, como los ultrasónicos, en ríos también es constante en proyectos previos, pues se pudo medir la profundidad de un río en la India, esto con el fin de monitorear datos informativos de nivel de agua [8].

Sin embargo, a diferencia del proyecto que se quiere implementar en nuestra región, en este proyecto se utilizó un dron para fijar varios tipos de sensores, ya que es necesario informar acerca de otros parámetros medibles, los cuales no tienen similitud alguna con el proyecto que se va a realizar, los resultados obtenidos por los sensores mostraron el nivel del agua en el río, además de flujo de agua y elementos que la contaminan, como resultado obtenido se puede hablar de un constante monitoreo que permitió a moradores de las cuencas visualizar los datos antes mencionados. La elección de un módulo “LoRa” también es fundamental para controlar el monitoreo en lo que se refiere a sistemas alejados de zonas en las que existen características idóneas para realizar una conexión fiable de nodos, es así que en Indonesia, utilizando módulos y tecnología LoRa, se monitorea la contaminación de un río en determinado tiempo, la arquitectura del sistema en este estudio consiste en un nodo sensor que funciona para obtener datos sobre acidez, temperatura y turbidez del agua, y los resultados obtenidos plantean que el mejor rendimiento se obtiene a 50 m, pues hay menor pérdida de paquetes y menor retraso, mientras que a mayor distancia se pierden más paquetes, haciendo la distancia menos fiable [9].

En nuestro entorno también se han realizado proyectos de monitoreo frente a amenazas ambientales, y aunque en el proyecto mencionado se enfoca en monitorear datos para evitar incendios forestales, se empleó la comunicación LoRa a 915MHz con el fin de alertar el inicio de un incendio forestal mediante monitoreo constante de datos transmitidos, logrando en los resultados un alcance máximo con LoRa de 1Km de distancia [10].

El sistema más parecido al deseado e implementado en nuestra ciudad es en el que se obtuvieron datos mediante sensores ubicados a lo largo del río Yanuncay para generar una alerta temprana con el fin de informar previo a una inundación, este proyecto es similar al que se quiere plantear pues ante las largas distancias de transmisión de datos se utilizó tecnología LoRa con la misma finalidad de alerta, en lo referente a resultados obtenidos, se considera mucho la línea de vista al utilizar tecnología LoRa pues los datos al perderse la misma son más propensos a perderse, sin embargo al comparar la información monitoreada con la de una plataforma pública hidrometeorológica se obtuvieron datos similares [11].

Se desarrolló también una estructura de detección de objetos

empleando sensores ultrasónicos, y se estableció una comunicación entre los nodos a través de la tecnología LoRa, con el propósito de llevar a cabo monitoreos urbanos. El estudio realizado mostró a este tipo de sistemas como una introducción altamente efectiva a las ciudades inteligentes demostrando fiabilidad en la recepción inalámbrica de los datos. [12].

Cuando se habla de la seguridad de la red de sensores, incremento en la duración de la batería y fiabilidad de la entrega de paquetes de datos [13] demostró que el protocolo Secure Energy Aware Routing (SEAR) que basa su funcionamiento en la detección de nodos defectuosos aumenta la tasa de entrega de paquetes entre un 12% y un 15%, el rendimiento entre un 18% y un 22% y reduce el consumo de energía entre un 30% y un 35%, la pérdida de paquetes entre un 15% y un 18% y un retraso de un extremo a otro un 20-25% [13].

Cuando se habla del sistema de alarma de prevención y su efectividad indican que los sistemas de alarma en plataformas IoT son totalmente aplicables a la industria, hogares, oficinas, barcos, etc. Debido a que estos sistemas manejan mensajes de alerta a los usuarios con un tiempo considerable dependiendo el siniestro o desastre considerado a prevenir para el que fueron creados [14].

En las conclusiones del trabajo se demostró la viabilidad y eficiencia de la tecnología LoRa para la transmisión de datos a larga distancia, bajo consumo de energía, robustez frente a interferencias, así como su integración con plataformas web para la visualización y análisis de los datos recolectados por la red con una pequeña velocidad necesaria para la interconexión de cualquier tipo de sensores [15].

Se implementó un sistema de monitoreo para instalaciones de generación de energía renovable usando diversas plataformas IoT abiertas como Arduino, Raspberry Pi y LoRa demostrando una alta fiabilidad en la transmisión de datos a dichas plataformas con un 98% de datos recibidos tomando en cuenta las distintas interferencias de campo presentes [16].

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El proyecto consta de un sistema de obtención de datos de nivel de agua usando un sensor ultrasónico mediante el monitoreo basado en tecnología LoRa y datos móviles, esta información es transmitida para su visualización en una aplicación local, dicha información se utiliza para el análisis y alerta temprana ante un posible riesgo de inundaciones. El sistema es implementado en zonas sin cobertura de datos móviles de la región y por esta razón se busca transmitir los datos mediante estas tecnologías de comunicación inalámbrica. En la Fig. 2 se presenta un diagrama de la solución propuesta, dónde están indicadas las cuatro secciones en las que se ha dividido el sistema: obtención de datos, transmisión LoRa, transmisión LTE.

A. *Nodo Final*

La primera sección del proceso consta de la obtención de datos del nivel de agua mediante los nodos finales, los mismos que incluyen un sensor ultrasónico que se encuentra conectado a un microcontrolador, en este microcontrolador se carga un

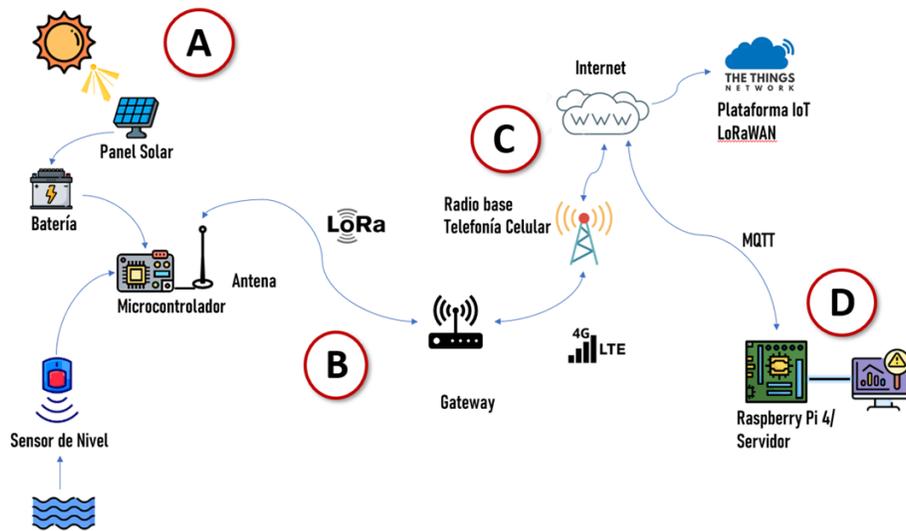


Fig. 2. Esquema gráfico del Sistema

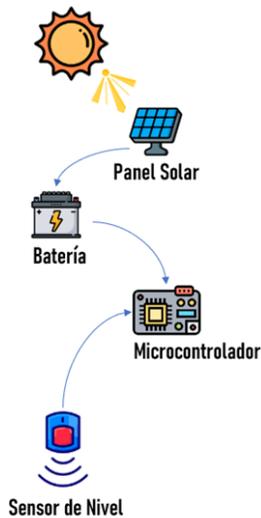


Fig. 3. Diagrama de bloques de la Sección A

código en lenguaje C++ cuyo diagrama de flujo se observa en el Anexo 1. Estas estaciones son denominadas estaciones de obtención de datos de nivel tal como se muestra en el diagrama de la Fig. 3.

- **Microcontrolador:** El modelo de dispositivo utilizado en este proyecto es el Arduino MKR WAN 1310 cuyas especificaciones técnicas fueron obtenidas del sitio web Arduino y se muestran en la tabla I [17].

TABLA I
ESPECIFICACIONES DEL MICROCONTROLADOR ARDUINO MKR WAN 1310.

Microcontrolador	SAMD21 Cortex®-M0+ 32bit bajo consumo ARM MCU
Módulo de Radio	CMWX1ZZABZ
Fuente de Energía	5V
Baterías Soportadas	Li-Ion, Li-Po, recargable, capacidad mínima 1024 mAh
Voltaje de Operación	3.3V
Pines Digitales E/S	8
Pines PWM	13 (0 .. 8, 10, 12, 18 / A3, 19 / A4)
UART	1
SPI	1
I2C	1
Pines de Entradas Analógicas	7 (ADC 8/10/12 bit)
Pines de Salidas Analógicas	1 (DAC 10 bit)

- **Sensor Ultrasónico de Nivel:** El elemento de medición empleado es el sensor ultrasónico MaxSonar-WR 7588 [18]. La comunicación hacia el microcontrolador se realiza utilizando un puerto Serial. Sus especificaciones fueron obtenidas del sitio web MaxSonar y se pueden observar en la tabla II.
- **Fuente de Alimentación:** Debido a que el sistema demanda un consumo, se realizan los cálculos de dimensionamiento de Panel Solar y batería. Se utiliza el dispositivo de alimentación Solar Power Manager (B), el cual tiene las especificaciones obtenidas del sitio web Waveshare Electronics y son mostradas en la tabla III [19].

TABLA II
ESPECIFICACIONES DEL SENSOR

Sensor	MB7588 SCXL-MaxSonar-WRMLT
Resolución	1mm
Transductor	Autoimplante
Compensación	Temperatura interna
Directiva	RoHS
Lecturas	Voltaje analógico, serial, PWM
Zona Muerta	±50mm
Voltaje de operación	2.7-5.5V
Consumo de corriente	68mA
Tamaño	Pequeño y ligero
Temperatura de funcionamiento	-40°C a +65°C (-40°F a +149°F)
Calibración	Automática de voltaje, humedad y ruido
Filtrado de Firmware	Tolerancia al ruido y rechazo a desorden
Certificación	IP67

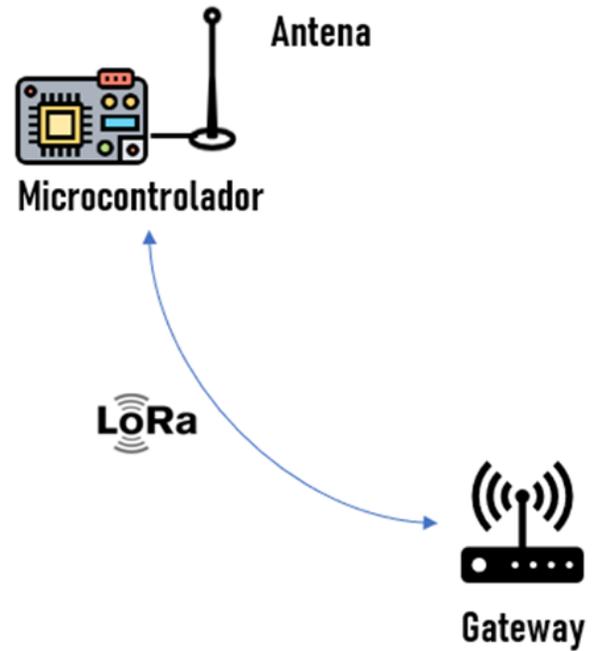


Fig. 4. Diagrama de bloques de la Sección B

TABLA III
ESPECIFICACIONES DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Entrada Solar	6V 24V (18V por defecto)
Recarga	Panel solar, adaptador de corriente, USB
Batería	Batería Li-po de 3,7 V y 10000 mAh
Entrada USB	5V (TYPE-C, con soporte de carga rápida PD)
Salida de 5v	5V / 3A (SALIDA USB, TIPO C)
Tensión de corte de recarga	4,2 V ± 1%
Sobretensión de protección de descarga	3,0 V ± 1%
Eficiencia de recarga de paneles solares	~78%
Eficiencia de recarga USB	~93%
Corriente de reposo (máx.)	<2mA
Carcasa	Estuche de metal
Temperatura de funcionamiento	-40 °C 85 °C
Dimensiones (mm)	108,0 × 71,0 × 25,2

B. Comunicación LoRa

En esta sección se emplea un radio enlace de comunicación LoRa para el envío de datos bidireccional entre la Antena del Nodo Sensor y el Gateway tal y como se puede visualizar en el diagrama de la Fig. 4, la comunicación se realiza en una banda de frecuencia entre 902-920 MHz y el enlace tiene una sensibilidad de -114 dBm.

- **Nodo Final (LoRa):** Se emplea la comunicación LoRa para la transmisión de los datos de nivel obtenidos del sensor ultrasónico hacia el Gateway los cuales son empaquetados en Bytes para su envío en una antena de dipolo. La tabla IV presenta las especificaciones necesarias para efectuar la comunicación, estos datos fueron obtenidos del sitio web Arduino [20].

TABLA IV
ESPECIFICACIONES DE LA COMUNICACIÓN LORA

	Detalles
Interfaces	I2C, UART, USB, SPI
ICs Principales	STM32L, SX1276
Reloj de Referencia	Reloj Integrado 32MHz (TCXO con error de frecuencia=±2 ppm) con reloj de 32.768KHz (error de frecuencia=±20 ppm)
Frecuencias Soportadas	868 MHz, 915 MHz
Tamaño del Módulo	12.5 mm x 11.6 mm x 1.76 mm (Max)
Peso	0.48g (Typ)
Envoltura	Encapsulado de metal
RoHS	Este módulo obedece a la directiva RoHS

- **Gateway (LoRa)** El dispositivo WisGate Edge PRO recibe mediante dos antenas omnidireccionales de 5.1dBi de ganancia, la señal LoRa para la demodulación CHIRP [21]. Su hoja de datos obtenida del sitio web Arduino se expresa en la tabla V.

TABLA V
ESPECIFICACIONES DEL DISPOSITIVO GATEWAY

Controlador	Tarjeta SX1303 mPCIe
Canales	16
RX Sensibilidad	-139 dBm (Min)
TX Potencia	27 dBm (Max)

C. Conexión a Red

En esta sección se realiza una comunicación bidireccional mediante la tecnología 4G LTE entre el Gateway y la página web The Things Network, esto se observa en el diagrama de la Fig. 5.

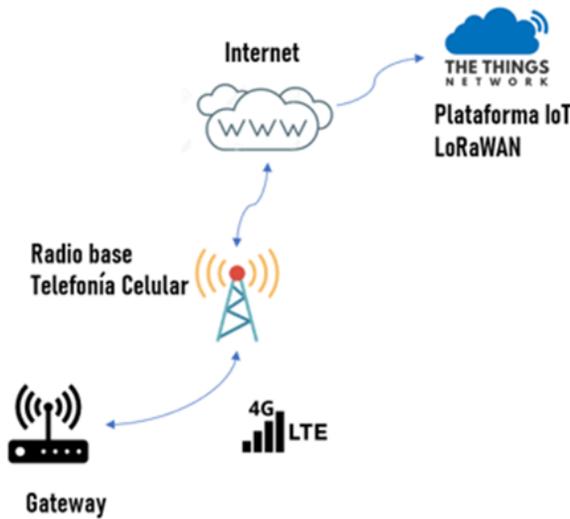


Fig. 5. Diagrama de bloques de la Sección C

- Gateway (LTE): En esta sección el dispositivo WisGate Edge PRO enlaza el nodo sensor con el sitio The Things Network, además transmite los datos de la comunicación LoRa hacia la misma mediante tecnología de datos móviles 4G LTE.
- Plataforma The Things Network: Esta plataforma es utilizada para registro y comunicación de dispositivos en redes LoRaWAN, se conecta mediante internet al Gateway, a su vez mediante el código Payload decodifica el paquete de los nodos sensores para su visualización del paquete recibido.

D. Visualización IoT

Esta sección es la encargada de la comunicación, muestreo y filtrado de los datos en un software con una interfaz gráfica amigable, en la misma que se incluye la Plataforma The Things Network y un dispositivo Raspberry Pi 4 en el cual se implementó la interfaz gráfica, la Fig. 6 logra evidenciar el diagrama de bloques referente a esta sección.

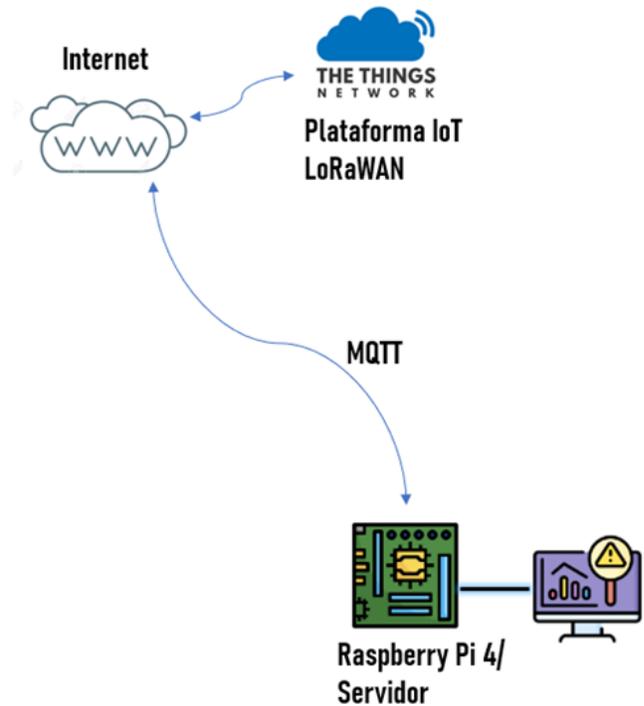


Fig. 6. Diagrama de Bloques de la Sección D

- Plataforma The Things Network En esta Plataforma se activa una integración de protocolo MQTT con Python 3 para obtener los datos de los nodos sensores en un dispositivo local.
- Raspberry Pi 4 Por medio del protocolo MQTT se reciben los datos de la página The Things Network, los mismos que se almacenan en una base de datos local para cada nodo sensor, permitiendo un filtrado específico calendarizado, y una exportación de los datos a un archivo .xlsx [22]. El código cargado al dispositivo se muestra en el diagrama de flujo del Anexo 2. La tabla VI muestra las especificaciones del dispositivo Raspberry, estos datos fueron obtenidos del sitio web Raspberry.

TABLA VI
INTERFACES DEL DISPOSITIVO RASPBERRY PI

Interfaces	802.11 b/g/n/ac Wireless LAN Bluetooth 5.0 con BLE 1 tarjeta Micro SD 2 puertos micro-HDMI dual con resolución hasta 4Kp60 2 puertos USB2 2 puertos USB3 1 puerto Gigabit Ethernet (Soporta PoE) 1 puerto Raspberry Pi Cámara CSI 1 puerto Raspberry Pi Cámara DSI
Interfaces GPIO	6 puertos UART 6 puertos I2C 5 puertos SPI 2 canales PWM
Software	Set ARMv8 Software Linux Disponibilidad de APIs en GPU

III. RESULTADOS

Se procedieron a realizar distintas pruebas de funcionamiento en cada sección del sistema, en base a estas se observa la fiabilidad de cada elemento del sistema y del proyecto en sí.

En la Fig. 7 se observa la lectura de los datos del sensor ultrasónico por medio de una comunicación serial, esta prueba se realizó posicionando el sensor a diferentes distancias de una fuente de agua, cabe recalcar que este sensor está configurado con una frecuencia específica para que el pulso ultrasónico rebote solo con líquidos.

```

16:50:30.199 -> Distancia: 1.000 metros
16:50:30.199 -> Data sent to TTN
16:51:00.198 -> Datos crudos: R1641
16:51:00.198 -> Distancia: 1.641 metros
16:51:00.198 -> Data sent to TTN
16:51:30.201 -> Datos crudos: R1637
16:51:30.201 -> Distancia: 1.637 metros
16:51:30.246 -> Data sent to TTN
16:52:00.222 -> Datos crudos: R1634
16:52:00.222 -> Distancia: 1.634 metros
16:52:00.222 -> Data sent to TTN
    
```

Fig. 7. Comunicación serial

La tabla VII muestra los valores medidos por cinco sensores MB7588 SCXL-MaxSonar-WRMLT en comparación con las distancias reales obtenidas mediante un flexómetro. Para evaluar la precisión de los sensores, se utilizaron diferentes alturas, lo que permitió calcular el error porcentual como indicador de rendimiento. Los resultados indicaron un error porcentual del 0.48% a una altura de 0.70 metros, del 2.35% a 1.07 metros, y del 2.38% a 1.60 metros.

TABLA VII
MEDICIÓN DE LA PRECISIÓN DE SENSORES A DIFERENTES DISTANCIAS.

Nivel 1: Distancia 0,7m			
Dispositivo	Distancia real (m)	Distancia medida (m)	Error Distancia (%)
Sensor de nivel 1	0,7	0,704	0,37
Sensor de nivel 2	0,7	0,705	0,48
Sensor de nivel 3	0,7	0,704	0,426
Sensor de nivel 4	0,7	0,704	0,62
Sensor de nivel 5	0,7	0,703	0,455
Nivel 2: Distancia 1,07m			
Dispositivo	Distancia real (m)	Distancia medida (m)	Error Distancia (%)
Sensor de nivel 1	1,07	1,096	2,294
Sensor de nivel 2	1,07	1,098	2,348
Sensor de nivel 3	1,07	1,097	2,48
Sensor de nivel 4	1,07	1,095	2,33
Sensor de nivel 5	1,07	1,095	2,312
Nivel 3: Distancia 1,60m			
Dispositivo	Distancia real (m)	Distancia medida (m)	Error Distancia (%)
Sensor de nivel 1	1,60	1,642	2,31
Sensor de nivel 2	1,60	1,643	2,41
Sensor de nivel 3	1,60	1,644	2,37
Sensor de nivel 4	1,60	1,644	2,42
Sensor de nivel 5	1,60	1,644	2,39

Mediante estos resultados se observa como el error de medición es inversamente proporcional a la distancia de la fuente de agua como se puede observar en la Fig. 8.

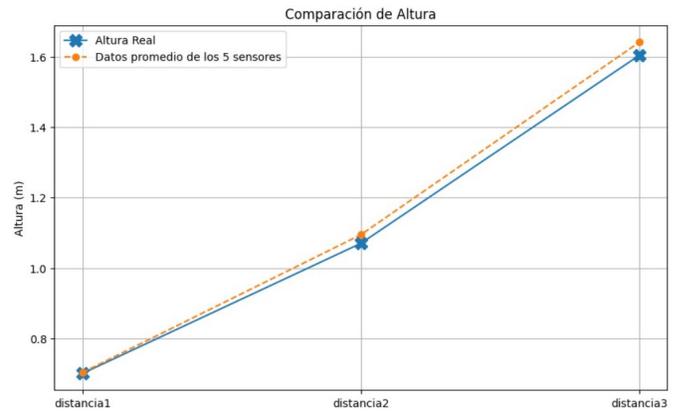


Fig. 8. Precisión de sensores de nivel

Para la alimentación del sistema del microcontrolador y el sensor de nivel se usó un panel solar y una batería de 5VDC, se procedió a hacer el dimensionamiento para una autonomía energética del sistema de 24 horas tomando como constante 4 horas de sol pico por día.

$$\text{Consumo total (mA)} = \text{Corriente de sensor de nivel (mA)} + \text{Corriente del microcontrolador (mA)}$$

$$\text{Consumo total} = 20 \text{ mA} + 80 \text{ mA} = 100 \text{ mA (0.1 Amperios)}$$

$$\text{Capacidad requerida (Ah)} = \text{Consumo del dispositivo (A)} \times \text{Duración deseada (h)}$$

$$\text{Capacidad requerida} = 0.1 \text{ A} \times 24 \text{ h} = 2.4 \text{ Ah}$$

$$\text{Capacidad de recarga (A)} = \frac{\text{Capacidad de la batería (Ah)}}{\text{Horas de sol pico (h)}}$$

$$\text{Capacidad de recarga} = \frac{2.4 \text{ Ah}}{4 \text{ h}} = 0.6 \text{ A (600 mA)}$$

$$\text{Potencia (W)} = \text{Voltaje (V)} \times \text{Corriente (A)}$$

$$\text{Potencia requerida} = 6 \text{ V} \times 0.6 \text{ A} = 3.6 \text{ W}$$

Se realizaron pruebas de distancia referenciadas a diferentes ángulos en relación a la posición del Gateway y a 4 distancias diferentes (cada 500 m) con el fin de obtener parámetros de potencia. Se utilizó un mapa base con el fin de tener varios puntos de interés, en este caso a cada 30 grados de separación tal como se observa en la Fig.9.

De acuerdo a la Fig.10 se puede observar como la potencia de recepción es inversamente proporcional a la distancia a la cual se efectuó la medida, para esto es importante mencionar que se deben tomar en cuenta obstáculos que obstruyen la línea de vista. En algunos puntos medidos la potencia disminuye debido a la presencia de objetos como árboles, edificios que reducen considerablemente la potencia recibida por el Gateway. Este efecto se acentúa en distancias a partir de 1000m

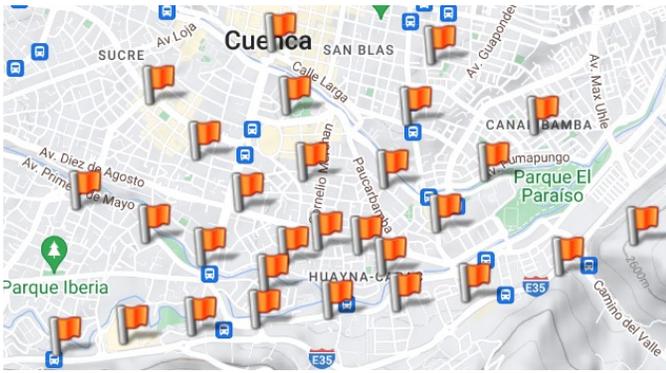


Fig. 9. Puntos de medición de potencia

donde la potencia de recepción es menor que la sensibilidad del Gateway, resultando en la pérdida de la información.

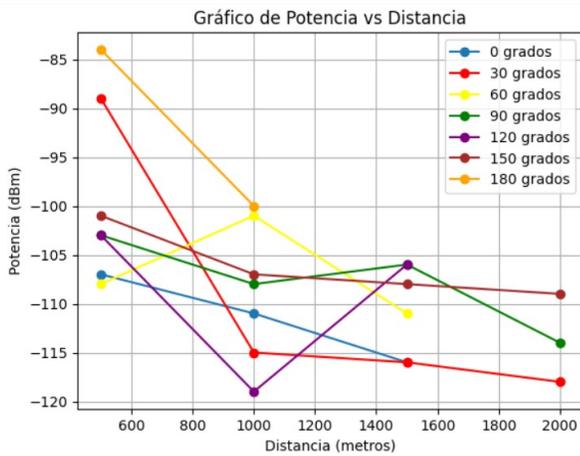


Fig. 10. Recepción de potencia

Para verificar la comunicación confiable entre el Gateway y el servicio The Things Network a través de la red móvil 4G, se registraron todos los dispositivos que operan con LoRaWAN. Adicionalmente, se desarrolló un código Payload capaz de recibir y decodificar simultáneamente los datos de los sensores de nivel de todos los microcontroladores. Esta funcionalidad se ilustra en la Fig.11, extraída de la plataforma de The Things Network.

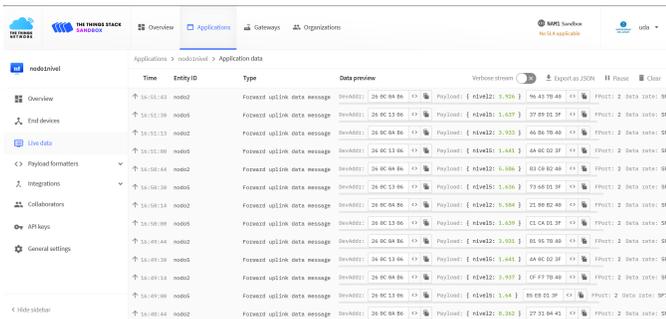


Fig. 11. Datos recibidos en The Things Network

Se desarrolló una aplicación en Python que utiliza el protocolo MQTT para establecer comunicación con los servidores de The Things Network. La función es obtener datos de cada nodo final para almacenarlos en bases de datos locales. Esta aplicación se ejecuta en un dispositivo Raspberry Pi 4 que actúa como servidor. La aplicación posee una interfaz gráfica por la cual se puede acceder a los datos de cada una de los nodos finales como se muestra en la Fig.12.



Fig. 12. Menú principal de aplicación

Al ingresar en la ventana de cualquier nodo de medición, se desplegará un calendario con fecha de inicio y final la cual permite filtrar los datos a un determinado tiempo, después de realizado este paso se observa una tabla con la medición de nivel de agua y un timestamp. Además, de un gráfico en el que se observa la variación del nivel de agua en el tiempo, aparte se incluye un botón para descarga de la tabla de datos en formato .xlsx como se observa en la Fig.13.

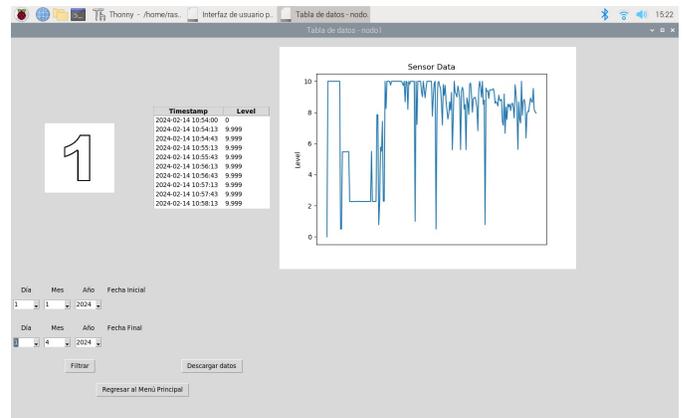


Fig. 13. Página de datos del nodo final

IV. CONCLUSIONES

Para el funcionamiento continuo del sistema se vió la necesidad del uso de energías renovables, mediante el uso de un panel solar y una batería. Este sistema permitió alcanzar la autonomía de funcionamiento, ya que se obtuvo alimentación ininterrumpida, además, se acopló el sistema en

una caja con certificación IP 54, misma que protege a todos los componentes, impermeabilizando las zonas de filtrado de agua. También, en el microcontrolador se programó un código que ingresa a la plataforma IoT mediante credenciales de autenticación y el rango de frecuencias en uso, el sensor envía los datos de nivel mediante comunicación serial al microcontrolador, el cual envía los mismos a la plataforma IoT cada determinado tiempo según lo requerido, todo esto funcionando en bucle infinito. Como servidor de visualización y gestión de archivos, se empleó un dispositivo Raspberry Pi 4, aplicando un código que emplea MQTT para obtener los datos de la plataforma IoT de LoRa; una de las razones principales para el uso del dispositivo indicado fue el costo elevado de suscripción a las plataformas IoT. En el servidor local se creó una interfaz gráfica para la visualización, filtrado y descarga de datos de nivel en un tiempo determinado. Finalmente, mediante pruebas de campo se logró determinar la relación distancia de medición y error del sensor, las cuales son directamente proporcionales, además del tiempo necesario de calibración automática del mismo, esto con el fin de obtener una medición válida. Se realizaron pruebas de alcance del radioenlace entre los nodos finales y el Gateway evidenciando la influencia de obstáculos como edificios y árboles que disminuyen la potencia de la señal recibida.

REFERENCIAS

- [1] Satista, "Número de desastres por inundaciones en todo el mundo." 2023.
- [2] M. Belanger and N. Doyle, "América latina y el caribe: Desastres = amenazas naturales + vulnerabilidades humanas," *UN Humanitarian*, 2024.
- [3] E. Comercio, "En cuenca fuertes lluvias ocasionan inundaciones e incremento de caudales en ríos," 2022.
- [4] ElComercio, "Lluvias en cuenca causan inundaciones en 5 sectores este 8 de abril," *ElComercio*, 2023.
- [5] Primicias, "Cuenca sufrirá "eventos intensos" en esta temporada de lluvias." 2023.
- [6] Y. Koike and O. Takyu, "Water level monitoring system based on 429mhz lora with packet level index modulation," in *2023 Fourteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, 2023, pp. 76–81.
- [7] E. A. Kadir, A. Siswanto, S. L. Rosa, A. Syukur, H. Irie, and M. Othman, "Smart sensor node of wsns for river water pollution monitoring system," in *2019 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet)*. IEEE, 2019, pp. 1–5.
- [8] A. Afzan, K. Harikrishnan, and R. Harikrishnan, "River mapping using ultrasonic and flow meter sensors," in *2020 Third International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*. IEEE, 2020, pp. 627–631.
- [9] H. Nurwarsito and R. D. Christian, "River water pollutant level monitoring system using websocket protocol and lora communication module," in *2021 2nd International Conference on ICT for Rural Development (IC-ICTRuDev)*. IEEE, 2021, pp. 1–6.
- [10] E. F. Morochó Barros and J. W. Ríos Barrera, "Implementación de un sistema de monitoreo y posicionamiento geográfico para la prevención de incendios forestales mediante una red sensorial," B.S. thesis, Universidad del Azuay, 2021.
- [11] D. E. Armijos Priori and J. J. Narvaez Guayllas, "Sistema de alerta temprana de riesgo de inundaciones basado en el protocolo de comunicación lora," B.S. thesis, Universidad del Azuay, 2020.
- [12] T. Addabbo, A. Fort, A. Mecocci, M. Mugnaini, S. Parrino, A. Pozzebon, and V. Vignoli, "A lora-based iot sensor node for waste management based on a customized ultrasonic transceiver," in *2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [13] K. Haseeb, K. M. Almustafa, Z. Jan, T. Saba, and U. Tariq, "Secure and energy-aware heuristic routing protocol for wireless sensor network," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 163 962–163 974, 2020.
- [14] Z. Tasnim, S. Das, R. Islam, J. Biswas, F. J. M. Shamrat, and A. Khater, "Sensor based smart automated gas leakage detection and prevention system," in *2022 6th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*. IEEE, 2022, pp. 460–466.
- [15] M. G. Ortiz Sosa, "Desarrollo de una red de sensores inalámbricos utilizando tecnología lora para el monitoreo de un sistema," 2020. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18469>
- [16] R. Pi, "Raspberry pi 4 model b," 2024. [Online]. Available: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-product-brief.pdf>
- [17] Arduino. Arduino mkrwan 1310. <https://store.arduino.cc/products/arduino-mkr-wan-1310>.
- [18] M. Botix. Mb7588 scxl-maxsonar-wrmlt. <https://maxbotix.com/products/mb7588>.
- [19] Waveshare. Solar power manager (c), supports 3x 18650 batteries, multi protection circuits. <https://www.waveshare.com/product/modules/solar-power-manager-c.htm>.
- [20] Arduino. Arduino mkrwan 1310. <https://store.arduino.cc/products/arduino-mkr-wan-1310>.
- [21] ———. Wisgate edge pro. <https://docs.arduino.cc/hardware/wisgate-edge-pro/tech-specs>.
- [22] Raspberry. Raspberry pi 4 model b. <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf>.

ANEXOS

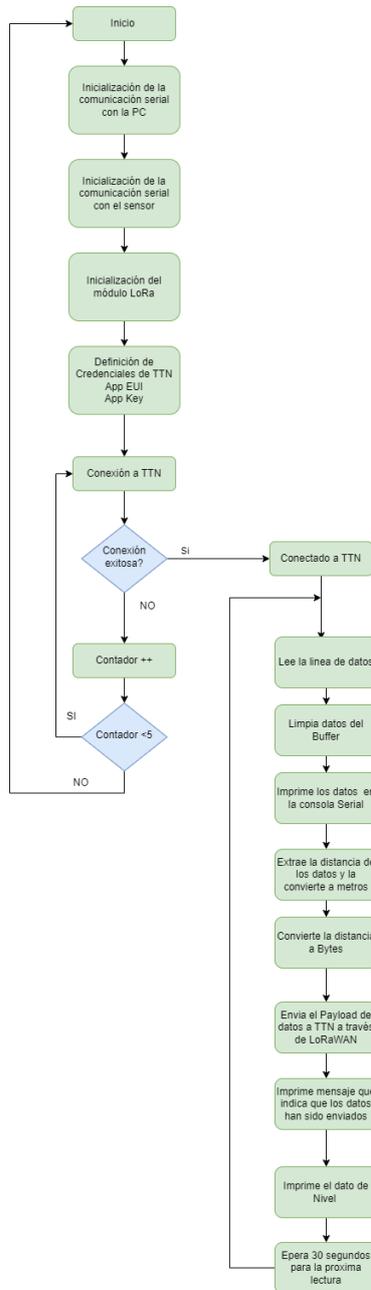


Ilustración 1 Anexo 1

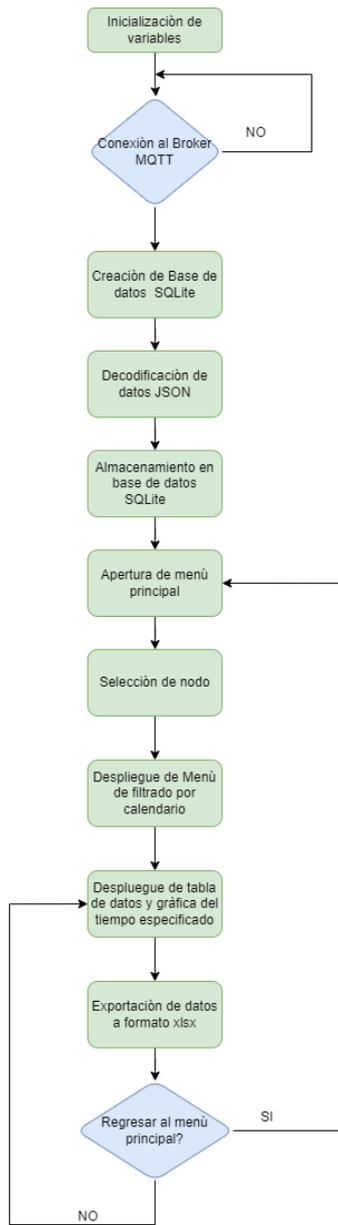


Ilustración 2 Anexo 2